



Alexandre Manuel Afonso Costa

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Simulação, Desenvolvimento de
Equipamento e Validação Experimental
de Ensaios Não Destrutivos com
Células Bacterianas**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos,
Prof. Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente:	Doutora Rosa Maria Mendes Miranda
Vogais:	Doutora Maria Luísa Coutinho Gomes de Almeida
	Doutora Carla da Conceição Caramujo Rocha de Carvalho
	Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos

Simulação, Desenvolvimento de Equipamento e Validação Experimental de Ensaio Não Destrutivo com Células Bacterianas

Copyright © 2014 Alexandre Manuel Afonso Costa

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido possível sem a contribuição de inúmeras pessoas e sem as quais o meu esforço teria sido insuficiente para o tornar realidade. Assim, desejo agradecer:

Ao meu orientador, o professor Telmo Santos, pelo seu empenho e energia dedicados a este trabalho, pelos conselhos sobre a vida profissional e pelo exemplo que constitui para mim. Considero um privilégio ter podido trabalhar conjuntamente com ele, tendo aprendido muito mais do que poderia imaginar no início deste trabalho.

À professora Doutora Carla de Carvalho, pela disponibilização das condições necessárias para a realização dos ensaios experimentais. Sem a sua colaboração não teria sido possível a validação experimental da técnica de Ensaios Não Destrutivos aqui desenvolvida.

Ao Sr. António Campos e ao Sr. Paulo Magalhães o meu sincero obrigado pela ajuda valiosa para a concretização deste trabalho.

Aos bolseiros de investigação Patrick Inácio e Gonçalo Sorger, os meus sinceros agradecimentos pelo seu contributo para este trabalho, pelos ensinamentos transmitidos e pela sua amizade.

Ao meu colega Miguel Machado pelo seu companheirismo e amizade, que marcou o meu quotidiano durante o desenvolvimento deste trabalho e que muito contribuiu para superar algumas das adversidades encontradas.

Ao meu colega David Barbosa pela sua amizade e pela convivência durante todo o meu percurso académico nesta faculdade, tendo sido muito mais que um amigo, um irmão. Quero expressar o meu sincero bem-haja à sua família, que me acolheu e passou a ser minha também.

Aos amigos de sempre e colegas de curso, pelos seus incentivos e amizade;

A todos os meus professores, pelo conhecimento transmitido e pelo tempo disponibilizado para esclarecer as minhas dúvidas e questões;

Aos meus pais, irmão e avós, pelo seu amor e apoio incondicional, sem os quais não teria sido possível chegar até onde me encontro.

Desejo também agradecer às seguintes instituições e empresas:

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT – MEC), pelo suporte financeiro concedido a este trabalho no âmbito do projecto I&D MicroBac (PTDC/EME – TME/ 118678/ 2010);

Ao Instituto de Biotecnologia e Bioengenharia (IBB) do Instituto Superior Técnico (IST);

Ao Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ);

À Polícia Judiciária de Setúbal.

RESUMO

A técnica de Ensaios Não Destrutivos (END) baseada em células bacterianas (CB) foi proposta recentemente e tem demonstrado viabilidade na identificação de micro defeitos superficiais, com espessuras e profundidades inferiores a 5 μm , em vários materiais de engenharia. O conhecimento processual já é significativo, mas diversos aspectos carecem de desenvolvimentos, nomeadamente, a interacção das bactérias com outros materiais, o limiar de detectabilidade da técnica, a aplicação a defeitos naturais ou o comportamento dinâmico das bactérias sujeitas a campos eléctricos ou magnéticos. Este trabalho pretendeu ser um passo em frente no conhecimento da técnica. Os principais objectivos foram alargar a documentação sobre a interacção bactéria-material, determinar o menor defeito padrão possível de detectar, estabelecer e validar um modelo analítico da dinâmica das bactérias sujeitas a forças exteriores, e comparar o desempenho da técnica com os END por líquidos penetrantes (LP). Foi desenvolvido e testado um protótipo para aplicação de campos magnéticos permanentes triaxiais. A bactéria *Rhodococcus erythropolis* foi usada na inspecção dos materiais AA1100, AISI 316L, WC, titânio, NiTi, ouro, ABS e lentes oftálmicas, com defeitos padrão por micro e nano indentação e riscagem, assim como os defeitos existentes em soldaduras laser. A técnica foi testada nos padrões de sensibilidade dos LP para efeitos de comparação. Verificou-se que é possível identificar defeitos de nano indentação com largura e profundidades de aproximadamente 5,3 μm e 0,4 μm , respectivamente, e que também são identificados os defeitos dos padrões sensibilidade dos LP, com cerca de 1 μm de espessura.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaios Não Destrutivos (END)

Micro defeitos

Células bacterianas (CB)

Limiar de detectabilidade

ABSTRACT

A Non-Destructive Testing (NDT) technique based on bacterial cells (BC), was recently presented and has shown reliability concerning the identification of superficial micro defects, with thickness and depth inferior to 5 μm , in several engineering materials. The know-how is already significant, but other aspects need more development, namely the interaction of bacteria with different materials, the detectability limit, its ability to detect natural defects or the dynamical behavior of cells under the influence of electric or magnetic fields. This work aimed to be a step forward in the development of this technique. Its main goals were to broaden the knowledge about bacterial-material interaction, to determine the smallest detectable standard defect, to establish and validate an analytical model concerning the bacteria dynamism when subjected to external forces, and to compare the development of the technique with dye penetrant inspection. A prototype for implementation of triaxial magnetic fields was developed and tested. The *Rhodococcus erythropolis* bacteria was used to inspect AA1100, AISI 316L, WC, titanium, NiTi, gold, ABS and ophthalmic lens, with standard defects, produced by micro and nano indentation, by scribing, as well as the defects in laser welding. The technique was performed in test blocks for dye penetrant for comparisons purposes. It was concluded that is possible to identify nano indentation defects with approximately 5,3 μm length and 0,4 μm depth, as well as defects with 1 μm large in dye penetrant test blocks.

KEY-WORDS

Non-Destructive Testing (NDT)

Micro defects

Bacterial Cells (BC)

Detectability limit

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO.....	vii
PALAVRAS-CHAVE	vii
ABSTRACT	ix
KEY-WORDS	ix
ÍNDICE	xi
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xix
NOMENCLATURA	xxi
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Estado da Arte e Motivação.....	1
1.2 – Objectivos.....	2
1.3 – Trabalho desenvolvido	3
1.4 – Estrutura da Dissertação.....	4
2 – ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 – Introdução	5
2.2 – Técnicas de Ensaios Não Destrutivos para a detecção de micro defeitos	6
2.2.1 – Nanoemulsão polarizável magneticamente	6
2.2.2 – Efeito GMR aplicado aos Ensaios Não Destrutivos	8
2.2.3 – Correntes Induzidas	10
2.3 – Ensaios Não Destrutivos com células bacterianas.....	12
2.3.1 – Fundamentos da técnica de END com células bacterianas	12
2.3.2 – Metodologia de aplicação	12
2.3.3 – Protótipos funcionais	14
2.3.4 – Parâmetros da técnica	15
2.3.5 – Células bacterianas utilizadas para a detecção de micro defeitos superficiais	15

2.3.6 – Morfologia de defeitos e materiais testados.....	16
2.3.7 – Resultados da técnica	17
2.4 – Líquidos penetrantes	18
2.4.1 – Introdução.....	18
2.4.2 – Princípios Físicos	18
2.4.3 – Metodologia de aplicação do END por LP.....	18
2.4.4 – Tipos de LP	19
2.4.5 – Principais propriedades dos LP	20
2.4.6 – Padrões de sensibilidade	21
2.5 – Força magnética sobre um corpo ferromagnético	23
2.6 – Síntese do capítulo	24
3 – DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO FUNCIONAL PARA APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO	25
3.1 – Introdução	25
3.2 – Requisitos Funcionais	27
3.3 – Concepção do protótipo funcional	28
3.4 – Projecto e produção do protótipo funcional.....	29
3.4.1 – Electrónica e Instrumentação	31
3.4.2 – Software	32
3.5 – Caracterização do protótipo funcional	34
3.6 – Equipamentos Acessórios.....	41
3.7 – Síntese do Capítulo.....	42
4 – SIMULAÇÃO ANALÍTICA	43
4.1 – Introdução	43
4.2 – Modelo analítico do movimento das células bacterianas	44
4.3 – Determinação da carga das células bacterianas	47
4.4 – Síntese do Capítulo.....	52
5 – VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	53
5.1 – Introdução.....	53
5.2 – Caracterização dos provetes.....	54
5.2.1 – Materiais ensaiados	54

5.2.2	– Defeitos de micro indentação.....	57
5.2.3	– Defeitos de nano indentação.....	59
5.2.4	– Defeitos do tipo risco.....	60
5.2.5	– Defeitos com outras morfologias.....	62
5.3	– Células bacterianas utilizadas nos ensaios experimentais.....	62
5.4	– Procedimento experimental.....	62
5.5	– Ensaios experimentais com células bacterianas.....	64
5.5.1	– AA 1100.....	65
5.5.2	– AISI 316L.....	66
5.5.3	– Titânio (<i>grade 5</i>).....	69
5.5.4	– Níquel-titânio.....	71
5.5.5	– Carboneto de tungstênio.....	73
5.5.6	– AISI 316L Brasado.....	74
5.5.7	– Ouro.....	75
5.5.8	– Lentes oftálmicas.....	77
5.5.9	– Padrões de sensibilidade da técnica de END por LP.....	78
5.6	– Ensaios experimentais com líquidos penetrantes.....	79
5.6.1	– AA 1100.....	81
5.6.2	– AISI 316L.....	82
5.6.3	– Titânio (<i>grade 5</i>).....	82
5.6.4	– Níquel-titânio.....	83
5.6.5	– Cobre.....	84
5.6.6	– Acrilonitrila butadieno estireno (ABS).....	85
5.6.7	– Padrão de sensibilidade da técnica de END por LP.....	85
5.7	– Análise de Resultados.....	87
5.8	– Síntese do Capítulo.....	91
6	– CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS..	93
6.1	– Introdução.....	93
6.2	– Conclusões.....	94
6.3	– Propostas para desenvolvimentos futuros.....	96
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
	ANEXOS.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática das amostras (a, c, e) e a correspondente fotografia do sensor do nanofluido (b, d, f-i) [2].	6
Figura 2.2 – Representação esquemática da configuração experimental utilizada para a medição do campo magnético de fuga e recolha de imagem [2].	7
Figura 2.3 – Efeito GMR [7].	9
Figura 2.4 – Representação esquemática das linhas de campo magnético.	9
Figura 2.5 – Micro sensor: a) Dimensões; b) Representação esquemática	11
Figura 2.6 – Perfil superficial do defeito, medido com um microscópio confocal [1].	11
Figura 2.7 – Metodologia de aplicação da técnica [3].	13
Figura 2.8 – Matriz de defeitos: a) representação esquemática; b) alumínio; c) cobre [3].	16
Figura 2.9 – Padrões de sensibilidade. a) tipo 1; b) tipo 2 [18].	21
Figura 3.1 – Medição experimental da intensidade do campo magnético, B .	26
Figura 3.2 – Modelação do protótipo funcional em SolidWorks.	29
Figura 3.3 – Fotografias do protótipo funcional para aplicação de campo magnético permanente triaxial: a) Vista superior; b) Vista de frente.	31
Figura 3.4 – Placa de circuitos e respectivas ligações.	31
Figura 3.5 – Interface gráfica em LabVIEW para controlo do protótipo funcional.	32
Figura 3.6 – Sequência de funcionamento do modo efeito 3D.	33
Figura 3.7 – Sequência de funcionamento do modo vertical/horizontal.	33
Figura 3.8 – Sequência de funcionamento do modo pêndulo 3D.	34
Figura 3.9 – Coordenadas utilizadas para a definição da posição do ponto P .	35
Figura 3.10 – Representação do percurso tridimensional descrito pelo centro do íman.	36
Figura 3.11 – Aparato laboratorial para a medição da intensidade do campo magnético.	36
Figura 3.12 – Representação gráfica da intensidade do campo magnético B no plano de colocação dos provetes.	37
Figura 3.13 – Representação gráfica da intensidade do campo magnético B em função da distância ao íman permanente.	37
Figura 3.14 – Representação gráfica da intensidade do campo magnético em função da distância ao íman permanente.	38

Figura 3.15 – Aparato laboratorial para a medição da variação da intensidade do campo magnético aplicado pelo protótipo funcional em funcionamento.	39
Figura 3.16 – Representação gráfica da intensidade do campo magnético segundo os eixos X, Y, Z em função do tempo, para $\omega = 2$ rev/s.	39
Figura 3.17 – Representação gráfica da intensidade do campo magnético segundo os eixos X, Y, Z em função do tempo, para $\omega = 1$ rev/s.	40
Figura 3.18 – Representação gráfica da intensidade do campo magnético segundo os eixos X, Y, Z em função do tempo, para $\omega = 0,5$ rev/s.	40
Figura 3.19 – Equipamentos acessórios.	42
Figura 4.1 – Diagrama de corpo livre de uma CB [6].	45
Figura 4.2 – Ensaio de medição do deslocamento das CB com aplicação de campo eléctrico. .	47
Figura 4.3 – Movimento das CB observado ao microscópio óptico.	48
Figura 4.4 – Representação gráfica do deslocamento das CB em função do tempo.	50
Figura 4.5 – Representação gráfica da amplitude do movimento da bactéria, x, em função do tempo, t, para $E = 500$ kV/m.	51
Figura 4.6 – Representação gráfica da amplitude do movimento da bactéria, x, em função do tempo, t, para $E = 1000$ kV/m.	51
Figura 5.1 – Matrizes de micro indentações: a) disposição dos defeitos padrão nas matrizes de defeitos e sua localização no provete; b) morfologia dos defeitos.	58
Figura 5.2 – Representação esquemática da matriz de nano indentações.	59
Figura 5.3 – Produção de defeitos do tipo risco.	60
Figura 5.4 – Defeitos do tipo risco.	61
Figura 5.5 – Caracterização dos defeitos do tipo risco.	61
Figura 5.6 – Etapas da metodologia de aplicação da técnica:	63
Figura 5.7 – Ensaio AA 1100.	65
Figura 5.8 – Repetibilidade dos resultados (ambos exclusivamente com deposição de CB).	66
Figura 5.9 – Ensaio AISI 316L.	67
Figura 5.10 – Pormenor da localização das CB no interior de um defeito padrão.	67
Figura 5.11 – Ensaio AISI 316L com nano indentações.	68
Figura 5.12 – Ensaio Ti.	69
Figura 5.13 – Ensaio Ti com aplicação de campo eléctrico.	70
Figura 5.14 – Ensaio soldadura em Ti.	71
Figura 5.15 – Ensaio NiTi.	72
Figura 5.16 – Ensaio soldadura laser em NiTi. a) sem luz; b) com luz fluorescente; c) pormenor da soldadura (sem luz fluorescente); d) pormenor da soldadura (com luz fluorescente).	73

Figura 5.17 – Ensaio WC.....	74
Figura 5.18 – Ensaio AISI 316L Brasado.....	75
Figura 5.19 – Ensaio ouro. a) com luz; b) sem luz.	75
Figura 5.20 – Ensaio ouro. a) letras gravadas na superfície; b) pormenor (ampliação 150x) c) pormenor (ampliação 300x).	76
Figura 5.21 – Ensaio lentes oftalmológicas. a) exclusivamente com deposição de CB;.....	77
Figura 5.22 – Ensaio padrão de sensibilidade 1. a) sem CB; b) <i>Rhodococcus erythropolis</i> com potencial negativo; c) <i>Rhodococcus erythropolis</i> com potencial positivo.	78
Figura 5.23 – Ensaio padrão de sensibilidade tipo 1.....	79
Figura 5.24 – LP utilizados nos ensaios experimentais [18].....	80
Figura 5.25 – Ensaio AA 1100.....	81
Figura 5.26 – Ensaio AISI 316L: a) sem aplicação de LP; b) com LP (sem revelador); c) com LP após aplicação de revelador.....	82
Figura 5.27 – Ensaio Ti.....	83
Figura 5.28 – Ensaio NiTi. a) sem aplicação de LP; b) com LP (sem revelador).....	83
Figura 5.29 – Ensaio Cu. a) sem aplicação de LP; b) com LP; c) com LP (aplicação de revelador).	84
Figura 5.30 – Ensaio ABS. a) sem aplicação de LP; b) com LP (sem revelador).....	85
Figura 5.31 – Ensaio padrão de sensibilidade tipo 1.....	85
Figura 5.32 – Representação esquemática dos defeitos.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Caracterização dos protótipos funcionais da técnica de END com CB.	14
Tabela 2.2 – Propriedades das células bacterianas utilizadas nos ensaios [5].	16
Tabela 2.3 – Limiar de detectabilidade para os diferentes materiais testados [5], [6].	17
Tabela 2.4 – Propriedades de alguns LP [18], [19], [20].	22
Tabela 3.1 – Requisitos Funcionais do protótipo funcional.	28
Tabela 3.2 – Definição das relações de funcionamento do modo pêndulo 3D.	34
Tabela 4.1 – Variáveis do modelo analítico.	49
Tabela 4.2 – Deslocamento das CB medido experimentalmente.	49
Tabela 5.1 – Propriedades dos materiais testados [24].	54
Tabela 5.2 – Caracterização dos provetes utilizados nos ensaios experimentais.	55
Tabela 5.3 – Defeitos padrão e cargas correspondentes.	57
Tabela 5.4 – Dimensões dos defeitos padrão.	58
Tabela 5.5 – Nano indentações e cargas correspondentes.	59
Tabela 5.6 – Defeitos do tipo risco e cargas correspondentes.	60
Tabela 5.7 – Rugosidade máxima de cada provete.	61
Tabela 5.8 – Propriedades das CB utilizadas nos ensaios [6].	62
Tabela 5.9 – Planificação dos ensaios experimentais com CB.	64
Tabela 5.10 – Planificação dos ensaios experimentais com LP.	80
Tabela 5.11 – Síntese dos resultados dos ensaios com CB.	87
Tabela 5.12 – Síntese dos resultados dos ensaios com LP.	90
Tabela 5.13 – Comparação dos ensaios com CB com os ensaios com LP.	91

NOMENCLATURA

Siglas

AA	<i>Aluminium alloy</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
AMR	<i>Anisotropic Magneto Resistance</i>
BC	<i>Bacterial Cells</i>
CAD	<i>Computer Assisted Design</i>
CB	Células bacterianas
CI	Correntes Induzidas
DAQ	<i>Data acquisition</i>
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
END	Ensaio Não Destrutivo
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
GLARE®	<i>GLAss-REinforced Fibre Metal Laminate</i>
GMR	<i>Giant Magneto Resistance</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
ISQ	Instituto de Soldadura e Qualidade
IST	Instituto Superior Técnico
LP	Líquidos penetrantes
MFL	<i>Magnetic Flux Leakage</i>
MFL	<i>Magnetic Flux Leakage</i>
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i>
NI	<i>National Instruments</i>
NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
PF	Protótipo funcional
RGB	<i>Red-Green-Blue</i>
US	Ultra-sons

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Estado da Arte e Motivação

Actualmente verifica-se a tendência de miniaturização de produtos e seus componentes utilizados nas mais variadas áreas, como são exemplo a electrónica, a microfabricação e a biomédica. A procura crescente por microcomponentes tem associada a necessidade de detecção e caracterização de defeitos também cada vez mais reduzidos, mais concretamente de micro defeitos superficiais. Esta rápida evolução a nível tecnológico e industrial não foi contudo acompanhada pelas técnicas de Ensaios Não Destrutivos (END), sendo que as técnicas actualmente existentes não permitem a detecção e a caracterização destes defeitos com a fiabilidade pretendida. Deste modo, e não obstante a existência de algumas técnicas de END por Ultra-Sons (US) e Correntes Induzidas (CI) capazes de detectar micro defeitos, estas não permitem a inspecção de microcomponentes, dado que a dimensão das sondas utilizadas não permite aceder à localização dos defeitos, sendo frequente as dimensões das sondas serem superiores às dos componentes que se pretendem inspeccionar [1], [2].

Apesar do surgimento de algumas técnicas de END e da adaptação de outras para a inspecção de micro defeitos, constata-se a inexistência de uma técnica apropriada para a

inspecção de defeitos de geometria variada em microcomponentes, ou seja, com capacidade para detectar os micro defeitos e caracterizar a sua localização, morfologia e dimensão existentes nesses componentes.

Neste contexto, o Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI) do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da FCT-UNL tem vindo a desenvolver uma nova técnica de END, baseada na utilização de células bacterianas (CB) para a detecção de micro defeitos superficiais, nomeadamente em microcomponentes.

No trabalho desenvolvido por João Borges [3] foi comprovado o potencial da técnica para a detecção de micro defeitos superficiais. Posteriormente Bruno Mateus [4] desenvolveu protótipos de equipamento, enquanto Diogo Carvalho [5] realizou novos ensaios que permitiram determinar quais os parâmetros de ensaio que conduzem à obtenção de melhores resultados, dando continuidade ao trabalho inicialmente desenvolvido por João Borges. Mais recentemente foram desenvolvidos novos protótipos de equipamento, para a aplicação de campos eléctricos e magnéticos, com a finalidade de tornar possível a detecção de defeitos de dimensões mais reduzidas. Os campos magnéticos aplicados pelos diferentes protótipos funcionais existentes foram também caracterizados [6].

Perante o estado da arte, surge a necessidade de mudança de registo, seguindo-se agora a etapa de correlacionar os parâmetros dos ensaios com os respectivos resultados em termos de detecção de defeitos. Para tal, é necessário a elaboração de um modelo analítico que descreva o comportamento das CB quando sujeitas a diferentes condições de ensaio, nomeadamente, intensidade e frequência dos campos eléctricos ou magnéticos, assim como o atrito viscoso durante o movimento das CB.

1.2 – Objectivos

Tendo em consideração por um lado o conhecimento teórico e experimental adquirido com os vários trabalhos realizados ao longo dos últimos três anos, e considerando por outro lado a necessidade de dar resposta a diversas questões técnicas e científicas ainda em aberto, foi definido como objectivo central deste trabalho o aprofundamento do conhecimento processual da técnica de END com CB, ou seja, pretendeu-se aprofundar o estudo da técnica, por forma a compreender melhor os aspectos fenomenológicos envolvidos, bem como a sua influência nos resultados finais da inspecção.

Concorreram para este fim os seguintes objectivos, de caracter mais concreto ou particular:

- Expandir o conjunto de materiais ensaiados com a técnica de END com CB e estudar a interacção das CB com cada material, ou seja, a capacidade de a técnica detectar defeitos semelhantes em diferentes materiais;
- Avaliar a capacidade da técnica para a detecção de defeitos com morfologias de defeitos diferentes das inspeccionadas em trabalhos anteriores (defeitos padrão);
- Simulação analítica do movimento das CB e determinação da carga da bactéria utilizada na validação experimental da técnica de END com CB;
- Desenvolvimento e caracterização de equipamento dedicado para a aplicação de campo magnético permanente de elevada intensidade (da ordem de 1000 Gauss);
- Comparação da técnica de END com CB com a técnica de END por líquidos penetrantes (LP).

1.3 – Trabalho desenvolvido

Tendo em vista o cumprimento dos objectivos definidos, foi inicialmente efectuada uma pesquisa bibliográfica sobre as técnicas de END actualmente existentes para a detecção de micro defeitos superficiais.

Posteriormente e perante os últimos desenvolvimentos da técnica de END com CB, foram definidos os requisitos funcionais para um novo protótipo funcional para a aplicação de campo magnético. Este foi projectado, produzido, caracterizado e validado experimentalmente.

Foi simulado o movimento das CB na presença de campos eléctricos externos para diferentes condições de ensaio, nomeadamente, intensidade e frequência do campo eléctrico aplicado. Foi ainda estimada experimentalmente a carga da bactéria utilizada na validação nos ensaios da técnica de END baseada em CB.

Foram produzidos provetes em diferentes materiais, tais como o AA 1100, AISI 316L, titânio (*grade 5*), níquel-titânio, carboneto de tungsténio, cobre, ABS, AISI 316L brasado e em lentes oftálmicas. Nestes provetes foram produzidos defeitos padrão com diferentes dimensões e morfologias.

Procedeu-se à validação experimental do protótipo funcional desenvolvido, tendo sido igualmente utilizados protótipos funcionais já existentes. Foram ensaiados os provetes produzidos, bem como provetes com defeitos reais e com nano defeitos. Foram ainda

realizados ensaios com a técnica de END por LP e efectuada a comparação dos resultados com os ensaios com a técnica de END com CB.

1.4 – Estrutura da Dissertação

O presente trabalho encontra-se estruturado em seis capítulos ao longo dos quais se desenvolvem as matérias tratadas.

No Capítulo 2 é apresentado o estado da arte das principais matérias versadas neste trabalho, com ênfase nas técnicas de END actualmente existentes para a detecção de micro defeitos superficiais (§ 2.2). É também abordada a técnica de END por LP (§ 2.4) e a determinação da força que actua num corpo ferromagnético na presença de um campo magnético (§ 2.5). No § 2.6 é apresentada a síntese do capítulo.

O Capítulo 3 compreende a definição dos requisitos funcionais (§ 3.2), a concepção (§ 3.3), o projecto e a produção (§ 3.4), e a caracterização do novo protótipo funcional para a aplicação de campo magnético triaxial (§ 3.5). No §3.6 são apresentados os equipamentos acessórios utilizados na validação experimental deste trabalho e o § 3.7 constitui a síntese do capítulo.

O Capítulo 4 trata da simulação analítica do movimento das CB na presença de campos eléctricos e magnéticos aplicados. Neste sentido, é apresentado o modelo analítico utilizado e é determinada experimentalmente a carga da bactéria utilizada nos ensaios. São apresentados os resultados da simulação e algumas considerações sobre o modelo analítico utilizado.

No Capítulo 5 são caracterizados os provetes utilizados nos ensaios experimentais (§ 5.2), apresentadas as CB utilizadas (§ 5.3) e descrito o procedimento experimental da técnica de END com CB (§ 5.4). São apresentados os resultados dos ensaios experimentais com a técnica para os diferentes materiais testados (§ 5.5), bem como os resultados dos ensaios com a técnica de END por LP nos provetes com micro indentações (§ 5.6). No § 5.7 é efectuada a análise dos resultados da validação experimental e no § 5.8 é apresentada a síntese deste capítulo.

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido e as propostas para desenvolvimentos futuros.

2 – ESTADO DA ARTE

2.1 – Introdução

Neste capítulo é apresentada a revisão do conhecimento existente sobre as matérias relevantes para este trabalho. São apresentadas e analisadas as técnicas de Ensaios Não Destrutivos (END) existentes para a detecção de micro defeitos (§ 2.2), a técnica de END por líquidos penetrantes (LP) no § 2.4 e a determinação da força que actua sobre um corpo ferromagnético na presença de um campo magnético (§ 2.5). No § 2.6 apresenta-se a síntese do capítulo.

2.2 – Técnicas de Ensaio Não Destrutivos para a detecção de micro defeitos

2.2.1 – Nanoemulsão polarizável magneticamente

Recentemente foi proposta uma nova técnica de END [2] baseada na utilização de uma nanoemulsão polarizável magneticamente para detecção a olho nu da presença de defeitos. Nesta técnica de END, quando o nanofluido utilizado é sujeito à acção de um campo magnético e se encontra na presença de um defeito, a sua tonalidade altera-se na região envolvente do defeito, permitindo a sua identificação imediata a olho nu.

O fenómeno físico subjacente é a polarização da nanoemulsão causada pela perturbação das linhas de campo magnético associada à presença do defeito, que origina a referida alteração da tonalidade do nanofluido (Figura 2.1). Esta técnica possibilita a identificação da localização do defeito e da sua morfologia, tendo sido validada para defeitos de diferentes geometrias.

A grande vantagem desta técnica reside na sua simplicidade e celeridade da inspecção, sendo o seu campo de aplicação a detecção de defeitos superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos. A nanoemulsão polarizável magneticamente utiliza partículas ferromagnéticas, cuja dimensão é de, aproximadamente, 10 nm.

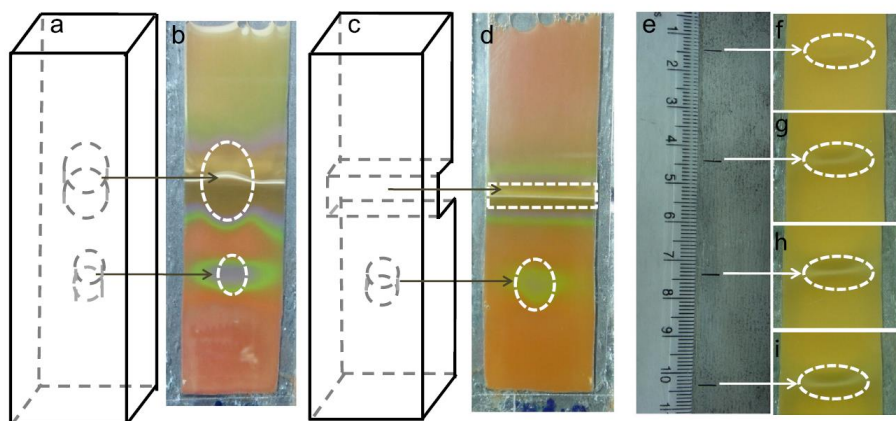


Figura 2.1 – Representação esquemática das amostras (a, c, e) e a correspondente fotografia do sensor do nanofluido (b, d, f-i) [2].

O procedimento de teste envolve a magnetização inicial da peça a examinar e a medição, utilizando sondas de Hall, das componentes normal e tangencial do campo magnético de fuga em torno do defeito para uma distância de *lift-off* constante de 1 mm. Após a magnetização da peça é colocada sobre a face oposta à face a inspecionar um sensor de filme fino com *lift-off*

constante e igual a 1 mm. O sensor é constituído pela nanoemulsão encapsulada entre duas lâminas de vidro transparentes paralelas e afastadas de 300 μm . As lâminas de vidro são ainda seladas lateralmente de forma a evitar contaminações do exterior.

Para a identificação do perfil do campo de fuga ao longo da peça, o sensor é deslocado sobre a totalidade da sua superfície. O campo de fuga de diferentes peças/amostras é medido utilizando uma sonda de Hall com a finalidade de avaliar o padrão de cor, localização e morfologia dos defeitos presentes. Uma vez retirado o campo magnético, o padrão de cor que permite identificar a presença de defeitos desaparece quase na totalidade, o que possibilita a reutilização do sensor.

A identificação da localização e forma dos defeitos é realizada pela conjugação do conhecimento (teórico) do campo de fuga junto dos defeitos, com o padrão de cor observado no sensor. Para a determinação da dimensão dos defeitos, a técnica recorre à análise do deslocamento do pico de Bragg e à análise dos perfis *Red-Green-Blue* (RGB). Na Figura 2.2 encontra-se a representação esquemática da configuração experimental utilizada pela técnica.

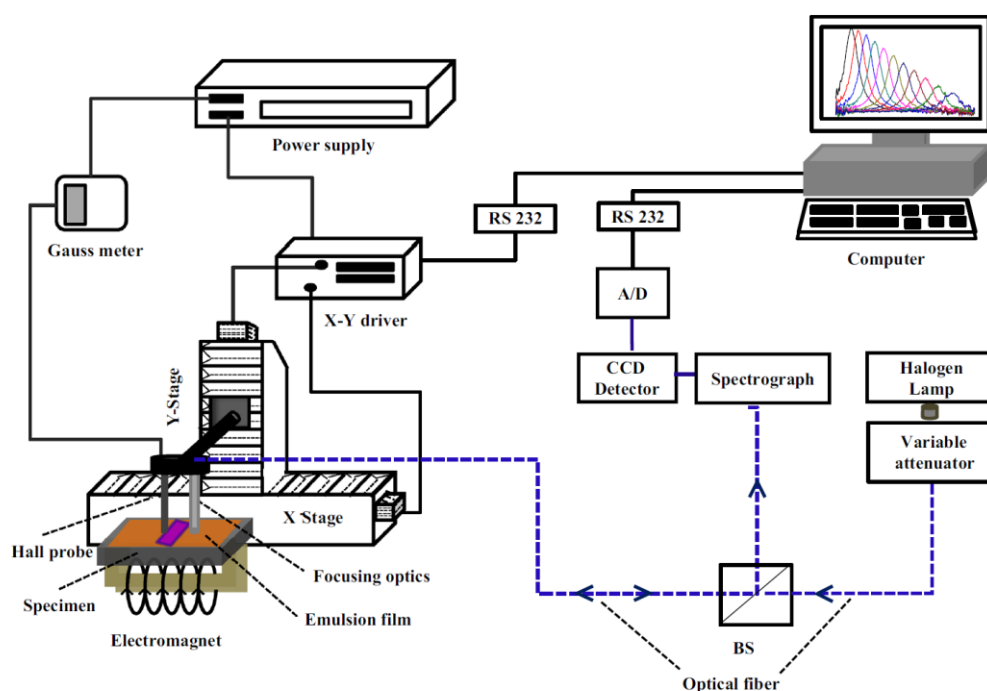


Figura 2.2 – Representação esquemática da configuração experimental utilizada para a medição do campo magnético de fuga e recolha de imagem [2].

O limiar de detectabilidade da técnica é de 500 μm (largura dos defeitos) para o aço. A identificação das dimensões dos defeitos tem associado um erro da ordem de 5% face às dimensões reais. Os autores desta técnica de END referem contudo a possibilidade de potenciar a sensibilidade da técnica utilizando emulsões melhor estabilizadas e através de campos magnéticos otimizados.

O campo de aplicação desta técnica de END é contudo bastante limitado, cingindo-se a materiais ferromagnéticos e cuja superfície seja plana. Por outro lado, esta técnica apenas permite caracterizar qualitativamente a localização dos defeitos, não possibilitando aferir quais as suas dimensões. Importa ainda notar que os defeitos existentes nas amostras testadas se limitavam a descontinuidades transversais com 500 μm de comprimento e 250 μm de largura e com uma orientação espacial favorável à sua detecção.

2.2.2 – Efeito GMR aplicado aos Ensaio Não Destrutivos

O efeito *Giant Magneto Resistance* (GMR)¹ é utilizado em diversas aplicações, entre as quais se encontram os END. Os sensores GMR têm uma grande aplicação como sensores em END com técnica de *Magnetic Flux Leakage* (MFL) [8] e com Correntes Induzidas (CI) [9],[10] dada a elevada sensibilidade e resolução espacial que possuem [11].

Um sensor GMR é constituído por duas lâminas ferromagnéticas separadas por uma outra de um material não magnético. O momento magnético possui sentidos opostos em cada uma das lâminas ferromagnéticas, sendo elevada a resistência eléctrica das mesmas. Quando aplicado um campo magnético externo, os momentos magnéticos de cada camada ficam orientados na mesma direcção, o que conduz à redução da resistência eléctrica anteriormente referida. Assim, um sensor GMR pode ser utilizado para detectar variações do campo magnético externo, sendo frequentemente constituídos por várias lâminas alternadas de um material ferromagnético com um material não magnético.

¹ A nível atómico, os electrões que se movimentam num material ferromagnético com uma determinada orientação de *spin* colidem de forma muito mais intensa quando a maioria dos electrões do material ferromagnético se encontra num estado de spin oposto ao seu. Deste modo, quando os momentos magnéticos das duas camadas se encontram alinhados paralelamente num canal de *spin* (a azul na Figura 2.3) as colisões entre os electrões é reduzida, enquanto no canal a verde as colisões entre estes são mais intensas. Por outro lado, quando os momentos magnéticos das duas camadas se encontram alinhados em anti-paralelo, ocorrem colisões entre electrões de forma mais frequente em ambos os canais, o que origina uma resistência superior ao movimento dos mesmos, comparativamente ao caso em que os momentos magnéticos se encontram alinhados paralelamente [7].

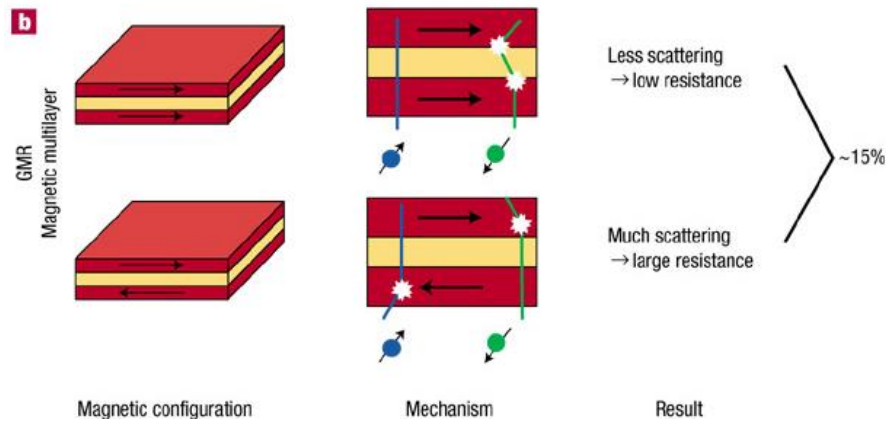


Figura 2.3 – Efeito GMR [7].

A detecção de defeitos num componente previamente magnetizado é deste modo possível através da deflexão das linhas de campo magnético nos locais de presença de defeitos (Figura 2.4), onde a permeabilidade magnética do meio (μ) é significativamente diferente da permeabilidade do material do componente (μ_{ar} vs $\mu_{componente}$). Enquanto a utilização de Partículas Magnéticas (PM) apenas permite visualizar as linhas de campo magnético, não possibilitando a caracterização dos defeitos, os sensores GMR permitem a identificação imediata da distribuição do campo magnético de fuga nos END por MFL [11].

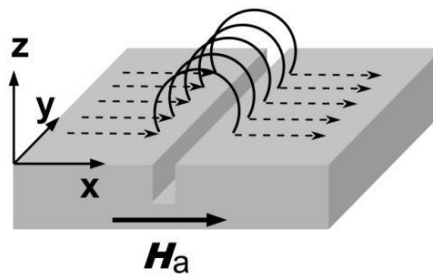


Figura 2.4 – Representação esquemática das linhas de campo magnético na presença de uma descontinuidade superficial [11].

Num trabalho recente, Matthias Pelkner [11] demonstrou que é possível a sua aplicação para a detecção de micro defeitos superficiais, dada a possibilidade de miniaturizar os sensores GMR com relativa facilidade. A técnica permite a detecção de defeitos com uma profundidade de 110 μm , comprimento de 5500 μm e largura de 90 μm , produzidos por electroerosão numa chapa de aço, independentemente do alinhamento do defeito. Importa contudo referir que para a detecção e caracterização de um defeito de, por exemplo, 500 μm de comprimento, o comprimento do sensor utilizado deve ser da ordem dos 200 μm , por

forma a garantir alguma redundância, ou seja, que a identificação do defeito é efectuada por mais do que um sensor (já que se trata de um *array* de sensores e não um único sensor).

Apesar desta técnica de END permitir a identificação dos defeitos independentemente da sua orientação espacial, os sensores utilizados apresentam dimensões da ordem dos defeitos detectados, o que pode impossibilitar a utilização da técnica para a detecção de defeitos em componentes que possuam dimensões inferiores às dos sensores utilizados. A técnica foi validada exclusivamente para uma morfologia de defeito e um material.

2.2.3 – Correntes Induzidas

Recentemente foi desenvolvido um novo sensor modular para a detecção de defeitos utilizando CI e fabricado com recurso à tecnologia de filmes finos [1]. Pelo facto de se tratar de um microsensor é possível a detecção de micro defeitos, bem como a sua detecção em áreas anteriormente inacessíveis aos sensores existentes. O sensor modular de CI é constituído por uma bobina de excitação e um sensor *Anisotropic Magneto Resistance* (AMR). O princípio de funcionamento do sensor reside no fenómeno de indução electromagnética: quando a bobina do sensor de CI é excitada com corrente alternada, é gerado um campo magnético em torno da mesma, que por sua vez induz uma corrente eléctrica na peça de teste (de material condutor). Esta corrente eléctrica cria um campo electromagnético secundário, que contraria o campo magnético que inicialmente lhe deu origem.

O sensor AMR, que é colocado paralelamente à superfície da peça por forma a não ocorrer contacto entre o sensor e a superfície da peça, é então utilizado para detectar o campo magnético gerado pela excitação da bobina e também as CI numa peça sem defeitos. Os defeitos presentes numa peça são detectados através da leitura de uma variação do sinal de saída do sensor originada pela perturbação da distribuição do fluxo das CI na peça, devido à presença de defeito(s). A Figura 2.5b ilustra o princípio de detecção utilizado pelo micro sensor modular. A existência de um defeito origina uma perturbação da distribuição das linhas de fluxo das CI, a qual se traduz no aumento da tensão (V) registada pelo sensor AMR. Deste modo, é possível detectar a presença de defeitos ou descontinuidades, sendo que a técnica permite correlacionar o aumento do valor do sinal do sensor AMR com a dimensão do defeito em causa. Para a realização dos ensaios, a bobina do sensor AMR foi excitada por uma corrente alternada de 0,3 A e a uma frequência de 8 MHz, e o sensor AMR colocado a uma distância de 5 μm acima da superfície da peça.

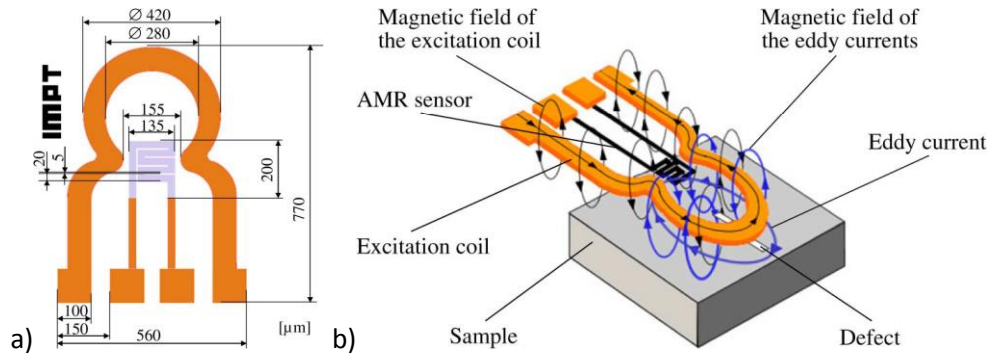


Figura 2.5 – Micro sensor: a) Dimensões; b) Representação esquemática do princípio de detecção de defeitos numa superfície com micro sensor modular [1].

A técnica revelou bons resultados quando utilizada para a detecção de defeitos em amostras de cobre, permitindo a detecção de defeitos inferiores a 50 μm. Os defeitos simulados nas amostras possuem 750 μm de comprimento, 144 μm de largura e 28 μm de profundidade, conforme a Figura 2.6 ilustra.

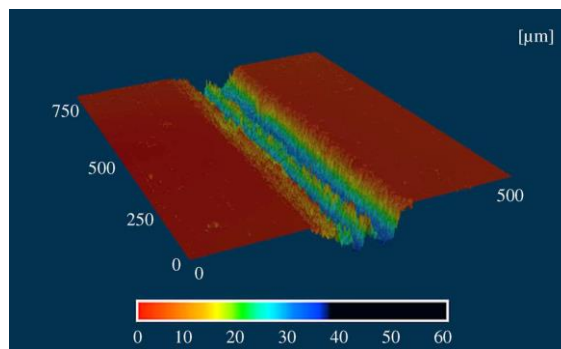


Figura 2.6 – Perfil superficial do defeito, medido com um microscópio confocal [1].

Esta técnica de END permite deste modo a detecção de micro defeitos, sendo que os resultados obtidos apresentam uma elevada correlação com as medições efectuadas com microscópio confocal. O campo de aplicação da técnica encontra-se contudo limitado aos materiais condutores (para ser possível a circulação das CI na peça) e a morfologia de defeito testada resume-se a fissuras.

2.3 – Ensaaios Não Destrutivos com células bacterianas

2.3.1 – Fundamentos da técnica de END com células bacterianas

A técnica de Ensaaios Não Destrutivos com células bacterianas (CB), desenvolvida no Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI) da FCT-UNL, recorre a diferentes propriedades destas células para a detecção de micro defeitos superficiais. Entre as características mais relevantes das CB encontram-se a aderência, fluorescência, dimensão, reprodutibilidade, morte, mobilidade e a interação com campos eléctricos e magnéticos. As propriedades eléctricas e magnéticas (magnetotaxia) das células podem ser utilizadas para potenciar a sua mobilidade e promover a penetração nos defeitos, recorrendo para o efeito à aplicação de campos eléctricos ou magnéticos.

2.3.2 – Metodologia de aplicação

A metodologia de aplicação desta nova técnica tem paralelismo com o END por líquidos penetrantes (LP), apresentando as seguintes etapas [3]:

- 1 – Identificação da área a inspeccionar;
- 2 – Limpeza superficial;
- 3 – Aplicação das CB;
- 4 – Penetração e aderência;
- 5 – Remoção do excesso de bactérias;
- 6 – Revelação;
- 7 – Inspeção e interpretação;
- 8 – Limpeza e esterilização da peça.

A primeira etapa consiste na identificação da localização do defeito, a que se segue, na segunda etapa, a limpeza da superfície para a desobstrução dos defeitos, para que na terceira etapa seja aplicada uma suspensão de CB. Uma vez aplicada a suspensão é necessário aguardar que as CB penetrem nos defeitos e adiram ao material que se encontra a ser analisado (quarta etapa), removendo-se o excesso da suspensão que não penetrou nos defeitos após decorrido o tempo de penetração (quinta etapa). Segue-se a revelação (sexta etapa), inspecção, interpretação e avaliação dos resultados (sétima etapa). Após concluída a etapa anterior procede-se à limpeza e esterilização da amostra analisada (oitava etapa), sendo que a permanência da suspensão de CB na amostra não deve exceder dez minutos, com o

intuito de evitar a adesão irreversível das CB à superfície. Na Figura 2.7 é ilustrada a metodologia de aplicação da técnica de END com CB.

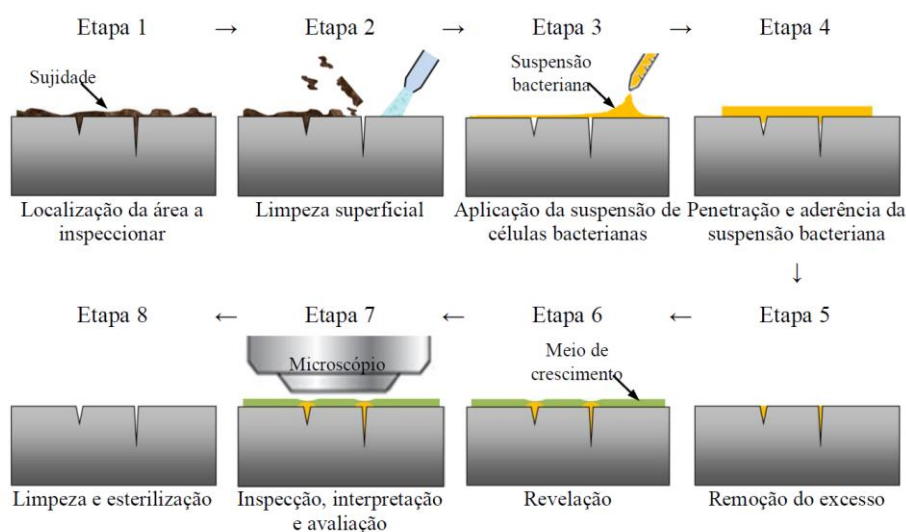


Figura 2.7 – Metodologia de aplicação da técnica [3].

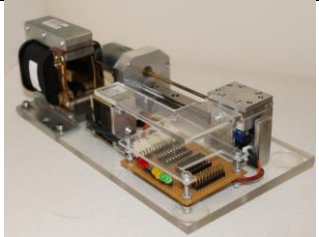
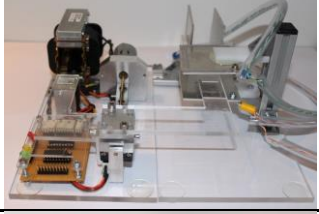

Existem variantes da metodologia de teste descrita. A etapa de penetração das CB nos defeitos (quarta etapa) é crucial para o êxito da técnica, existindo variantes que potenciam os resultados obtidos. Na sua variante mais simples, a mobilidade e penetração das CB deve-se apenas à sua capilaridade, molhabilidade e viscosidade, enquanto nas restantes variantes a mobilidade e penetração das bactérias nos defeitos é também promovida pela acção de campos eléctricos ou magnéticos, de acordo com as propriedades das CB utilizadas.

A eliminação do excesso da suspensão bacteriana (etapa 5) pode ser aplicada de acordo com diferentes variantes, nomeadamente, por remoção mecânica do excesso (por exemplo com um pano), por acção de radiação ultravioleta bactericida (comprimento de onda de ~ 250 nm) [12] incidente sobre as CB, cujo ângulo de incidência (θ) sobre a superfície pode variar entre 0° (rasante) e 90° (normal à superfície) ou ainda pela deposição, de forma selectiva, de um agente bacteriano apenas nas regiões da superfície ausentes de defeitos. Por fim, na sétima etapa, a análise da amostra pode ser feita a olho nu ou com recurso ao microscópio (com ou sem revelação). Podem adicionalmente ser utilizadas CB fluorescentes com a finalidade de auxiliar a visualização e a detecção dos defeitos.

2.3.3 – Protótipos funcionais

Considerando as variantes anteriormente descritas, esta técnica necessita de equipamento dedicado para a sua aplicação. Existem actualmente vários protótipos funcionais dedicados à aplicação de campos eléctricos [4], de campos magnéticos variáveis (biaxiais [4] e triaxiais [6]) e ainda de campos magnéticos permanentes [6]. Na Tabela 2.1 são caracterizados de forma sucinta os protótipos funcionais que conduzem à obtenção de melhores resultados pela técnica de END com CB [6], sendo apresentada a designação adoptada para cada um dos equipamentos neste documento.

Tabela 2.1 – Caracterização dos protótipos funcionais da técnica de END com CB.

Protótipo funcional	Designação	Intensidade do campo magnético* [Gauss]	Tipo de Campo	Fotografia
Equipamento de campo magnético H e V	PF_HeV	353	Biaxial variável	
Equipamento para aplicação de campo eléctrico	PF_eléctrico	84	Triaxial variável	
Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial (ímanes de neodímio)	PF_Btriaxial	~1000	Triaxial permanente	

*Intensidade máxima referente ao local de colocação dos provetes.

2.3.4 – Parâmetros da técnica

Diogo Carvalho [5] identificou os seguintes factores como sendo os principais parâmetros da técnica:

- Combinação de tipo de bactéria/tipo de material a inspeccionar;
- Método de deposição (derrame ou imersão);
- Tempo de penetração;
- Aplicação de campos eléctricos e magnéticos;
- Intensidade e frequência de aplicação dos campos eléctricos e magnéticos;
- Método de remoção do excesso.

O tempo de penetração não excede 4 minutos, dado ter sido verificado [3] que a penetração das células nos defeitos não melhora para tempos de penetração superiores, ocorrendo antes a adesão irreversível das células às superfícies. Em desenvolvimentos mais recentes [6] foi também verificado que uma pré-preparação das amostras, consistindo numa *molhagem* das mesmas com água/etanol, potencia a mobilidade e a adesão das bactérias aos defeitos superficiais.

2.3.5 – Células bacterianas utilizadas para a detecção de micro defeitos superficiais

As CB utilizadas por esta técnica de END não são patogénicas, sendo a selecção das CB utilizadas em cada ensaio realizada em função da sua dimensão, interacção com os materiais e o campo, eléctrico ou magnético, aplicado sobre o provete a ensaiar. Para os ensaios com aplicação de campo eléctrico, foi utilizada a bactéria *Rhodococcus erythropolis* DCL14 por esta possuir complexos de ferro. Relativamente aos ensaios com campo magnético, as bactérias utilizadas são a *Staphylococcus aureus* e *Staphylococcus hominis*, sendo que ambas contêm complexos de ferro, motivo pelo qual interagem com campos magnéticos. As principais propriedades das CB utilizadas nos ensaios encontram-se na Tabela 2.2.

Comum a todas as CB utilizadas é a fluorescência na gama de 480 – 500 nm. Esta é conferida às células por uma mistura de ácido nucleico verde fluorescente SYTO®9 (que confere a tonalidade verde a todas as células) e iodeto de propídeo (que confere uma tonalidade vermelha às células com membrana danificada) [13], [14]. Deste modo, é possível distinguir visualmente as células viáveis das células com membrana danificada.

Tabela 2.2 – Propriedades das células bacterianas utilizadas nos ensaios [5].

Designação	Propriedades eléctricas/magnéticas	Diâmetro [μm]	Condições de sobrevivência [°C]	Fonte de Carbono
<i>Rhodococcus erythropolis</i>	Eléctrica	0,92	24 – 35	Etanol ou hexadecano
<i>S. aureus</i>	Magnética	1,24	8 – 45	Glucose
<i>S. hominis</i>	Magnética	0,57	24 – 35	Glucose

2.3.6 – Morfologia de defeitos e materiais testados

A técnica de END com CB tem como objectivo a detecção de descontinuidades superficiais em diferentes materiais. Deste modo, o tipo de micro defeitos produzidos para a validação desta técnica de END foram obtidos por micro indentação, electroerosão e ainda com recurso a lixas. Relativamente aos micro defeitos produzidos por micro indentação, estes foram obtidos com um micro durómetro, que através da variação da carga aplicada pelo indentador Vickers permite obter defeitos artificiais de diferentes dimensões. Com a finalidade de melhor estabelecer o limiar de detectabilidade da técnica, a matriz de defeitos utilizada combina de forma variada os defeitos, para que um defeito de menor dimensão se encontre sempre próximo de um defeito maior. A utilização desta matriz tem como objectivo avaliar se nos casos em que a suspensão de CB não ocupa um defeito menor se tal se deve à inexistência de suspensão nesse local ou antes se trata de uma limitação da técnica, ou seja, incapacidade da suspensão penetrar no defeito. Na Figura 2.8 apresenta-se a representação esquemática da matriz de defeitos e as matrizes produzidas em diferentes materiais [3]. A distância entre dois defeitos adjacentes é de 300 μm.

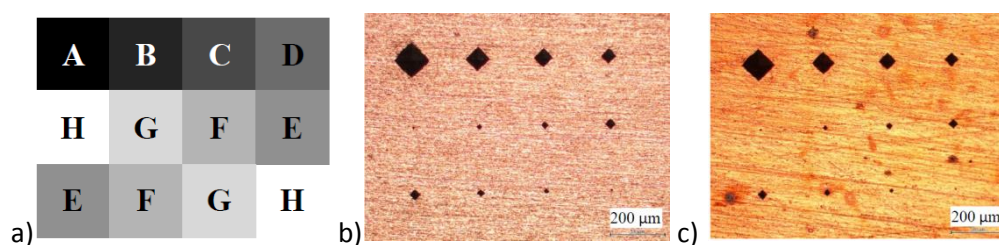


Figura 2.8 – Matriz de defeitos: a) representação esquemática; b) alumínio; c) cobre [3].

2.3.7 – Resultados da técnica

A Tabela 2.3 resume os ensaios experimentais realizados para os quais o limiar de detectabilidade da técnica de END com CB foi mais reduzido, para os respectivos materiais. As dimensões L e P [μm] representam, respectivamente, o lado e a profundidade do defeito.

Tabela 2.3 – Limiar de detectabilidade para os diferentes materiais testados [5], [6].

Material	Bactéria	Equipamento utilizado	Limiar de detectabilidade L [μm] / P [μm]	Último defeito detectado
Alumínio	<i>S. aureus</i>	PF_HeV	12,9/2,6	G
Aço Inox	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -	PF_Btriaxial	5,7/1,2	H
Cobre	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -	PF_eléctrico	9,7/2,0	H
Magnésio	<i>Rhodococcus erythropolis</i> +	PF_Btriaxial	27,0/5,5	F
Chumbo	<i>Rhodococcus erythropolis</i> +	PF_eléctrico	54,6/11,0	G
Ti (grade 5)	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -	PF_Btriaxial	9,1/1,8	G

Para os casos em que foi detectado o menor defeito (H), significa que o limiar de detectabilidade da técnica para o material em causa pode não se encontrar estabelecido, dado não se saber se as CB iriam penetrar em defeitos de menor dimensão. Para os materiais nestas condições é portanto necessário ensaiar defeitos de menor dimensão, com a finalidade de determinar o limiar de detectabilidade da técnica.

Foram testados outros materiais com a técnica de END com CB para além dos que constam na Tabela 2.3, nomeadamente a fibra de carbono, GLARETM (compósito de alumínio e fibra de vidro), grafite IC5 e níquel-titânio. Os ensaios experimentais realizados nestes materiais não foram bem sucedidos, não tendo sido possível detectar os defeitos padrão existentes [6].

2.4 – Líquidos penetrantes

2.4.1 – Introdução

O END por líquidos penetrantes (LP) é utilizado para a detecção de descontinuidades abertas à superfície em materiais sólidos não porosos, permitindo a detecção de descontinuidades com alguns micrómetros de dimensão, independentemente da configuração da peça a inspeccionar ou da orientação das descontinuidades [15].

O ensaio consiste na aplicação de um líquido sobre a peça a inspeccionar que, por capilaridade, preenche as descontinuidades abertas à superfície. O líquido penetrante permanece na superfície da peça por um determinado intervalo de tempo (tempo de penetração), sendo seguidamente removido o seu excesso. Segue-se a aplicação de um absorvente, mais especificamente um produto revelador que tem a finalidade de trazer de volta à superfície o líquido que penetrou na descontinuidade, revelando assim a presença desta.

O método de inspecção por LP não apresenta desenvolvimentos recentes, sendo reduzido o número de publicações científicas dedicadas a este tema na última década.

2.4.2 – Princípios Físicos

O END por LP depende principalmente da capacidade do líquido penetrante molhar a superfície da peça que se pretende examinar, recobrando-a de forma contínua e razoavelmente uniforme, e de posteriormente penetrar nas descontinuidades existentes na referida superfície [15]. A capacidade do líquido para detectar as descontinuidades depende, para além da dimensão destas, da tensão superficial, do ângulo de contacto formado entre o líquido e a peça e ainda da capilaridade. É desejável que um líquido penetrante apresente uma elevada tensão superficial e um pequeno ângulo de contacto.

2.4.3 – Metodologia de aplicação do END por LP

Independentemente do tipo de líquido penetrante utilizado, o ensaio compreende as seguintes etapas [15]:

- 1 – Preparação da superfície, que se deve apresentar completamente limpa e seca antes da realização do ensaio;

2 – Aplicação do líquido penetrante. Esta é efectuada após a limpeza da superfície da peça, e de forma ao penetrante recobrir toda a superfície, formando um filme contínuo. Este deve permanecer na superfície durante o tempo necessário (compreendido entre 5 a 30 minutos) para assegurar a máxima penetração do líquido nas descontinuidades existentes na superfície;

3 – Remoção do excesso do líquido penetrante, que constitui uma etapa crítica do ensaio, devendo esta ser executada de forma uniforme e evitando a remoção total do líquido penetrante. Uma remoção exagerada deste pode resultar na redução da visibilidade de um defeito, ou mesmo na sua omissão, enquanto uma remoção incompleta pode dissimular as indicações dos defeitos, através da identificação de falsos positivos. O método de remoção depende também do tipo de penetrante aplicado;

4 – Revelação, através da aplicação de um produto revelador que tem a finalidade de melhorar a visibilidade das indicações do líquido penetrante. O revelador forma um filme contínuo sobre a superfície da peça, promovendo o ressurgimento à superfície do líquido que havia penetrado nas descontinuidades;

5 – Inspeção e interpretação, em que a superfície é examinada em busca de penetrante que tenha regressado das descontinuidades à superfície, após a etapa de revelação. A inspeção de líquido penetrante colorido é realizada com luz branca enquanto para o líquido penetrante fluorescente ou misto a inspeção é realizada num ambiente que se encontre escurecido, sendo utilizada luz negra (comprimento de onda compreendido entre 320 e 400 μm) para provocar a fluorescência do penetrante utilizado;

6 – Limpeza final, por forma a remover os resíduos existentes na peça após o ensaio. Esta operação deve ser executada imediatamente a seguir à etapa de inspeção e interpretação de modo a evitar uma forte aderência do revelador à peça.

2.4.4 – Tipos de LP

Os LP podem ser classificados segundo o tipo de pigmento ou de acordo com o processo de remoção [16]. Relativamente ao tipo de pigmento, os LP classificam-se em:

- Penetrantes fluorescentes, que contêm um pigmento que na presença de luz negra emite luz visível. Apresentam geralmente uma tonalidade amarelada;
- Penetrantes coloridos, que contêm frequentemente um pigmento vermelho dissolvido e não necessitam de uma fonte de luz dedicada para a inspeção;
- Penetrantes mistos, os quais possuem propriedades dos penetrantes fluorescentes e dos penetrantes coloridos.

Quanto ao processo de remoção, os LP classificam-se em:

- Penetrantes removíveis com água. Estes são removidos por lavagem com água, sendo a base do penetrante constituída por um óleo insolúvel em água ao qual é adicionado um agente emulsionante, para ser possível a remoção com jacto de água;
- Penetrantes pós-emulsificáveis, que não contêm agente emulsionantes e portanto não são possíveis de eliminar apenas com água. Neste caso é necessária a aplicação de um emulsionante que reage com o líquido penetrante, permitindo então a sua remoção por lavagem com água.
- Penetrantes removíveis com solventes, que englobam os penetrantes removíveis com água e os penetrantes pós-emulsificáveis. Neste caso a remoção do penetrante é realizada com a aplicação de solvente.

Os LP podem também ser classificados quanto à sua *sensibilidade*, a qual se refere à capacidade do líquido penetrante permitir identificar fissuras finas. A sensibilidade é portanto determinada através da aptidão do penetrante preencher as fissuras e do brilho que apresenta uma vez no interior das descontinuidades, por forma a permitir a identificação dos defeitos. São geralmente considerados quatro níveis de sensibilidade: nível 1 (baixo), nível 2 (médio), nível 3 (alto), nível 4 (muito alto). A selecção do nível de sensibilidade do penetrante a utilizar depende do tipo e dimensão das descontinuidades, da qualidade superficial da peça a inspecionar e ainda de factores económicos [16].

2.4.5 – Principais propriedades dos LP

Para além das propriedades dos LP já referidas, existem outras que também são relevantes para a sua caracterização, nomeadamente [16]:

- A viscosidade, que influencia o tempo que o líquido necessita para penetrar nas descontinuidades. Geralmente as normas limitam a viscosidade dinâmica mínima a 5 centistokes;
- O ponto de inflamação, que quanto mais elevado for, menor será o risco de incêndio durante a manipulação do líquido (pontos de inflamação mínimos de 50° a 55°);
- A volatilidade, que deve ser reduzida por forma a impedir a sua fácil evaporação durante os ensaios;
- A estabilidade térmica, que é importante devido ao facto de os pigmentos do líquido penetrante perderem o brilho e a cor se submetidos a temperaturas elevadas;

- A inércia química, por forma a assegurar a compatibilidade com os materiais a ensaiar, evitando reacções químicas com os materiais;
- Solubilidade, facilidade de remoção e resistência à água. O penetrante deve permitir a sua fácil remoção da superfície, devendo contudo permanecer nas descontinuidades, bem como apresentar alguma resistência à contaminação com água sem alteração das suas propriedades físico-químicas;
- Fluorescência, no caso dos líquidos penetrantes fluorescentes;
- Toxicidade, dado que os penetrantes podem desencadear reacções alérgicas.

Na Tabela 2.4 apresentam-se as principais propriedades de um conjunto de LP de diferentes fabricantes.

2.4.6 – Padrões de sensibilidade

Com a finalidade de garantir que o penetrante e o revelador utilizados para um dado ensaio se encontram em condições adequadas, são realizados testes de sensibilidade. Para o efeito são utilizados dois tipos de padrões de sensibilidade, definidos pela norma ISO 3452-3 [17]. O padrão tipo 1 (Figura 2.9a) consiste num conjunto de quatro blocos (35 mm x 100mm x 2mm) em bronze, possuindo um revestimento com crómio-níquel (por galvanização), com uma espessura de 10, 20, 30 e 50 μm , respectivamente. Os padrões de 10, 20, 30 μm são utilizados para a determinação da sensibilidade de LP fluorescentes, enquanto os padrões de 30 e 50 μm são utilizados para os LP coloridos. Os padrões possuem fissuras transversais criadas através da tracção longitudinal dos mesmos, cuja profundidade corresponde à espessura do revestimento de crómio-níquel e largura correspondente, aproximadamente, a 1/20 da profundidade. O padrão tipo 2 (Figura 2.9b) consiste num único bloco, com uma metade revestida (por galvanização) com níquel e com uma camada fina de crómio, enquanto a outra metade apresenta quatro áreas com diferentes rugosidades. A metade galvanizada apresenta cinco defeitos em forma de estrela.

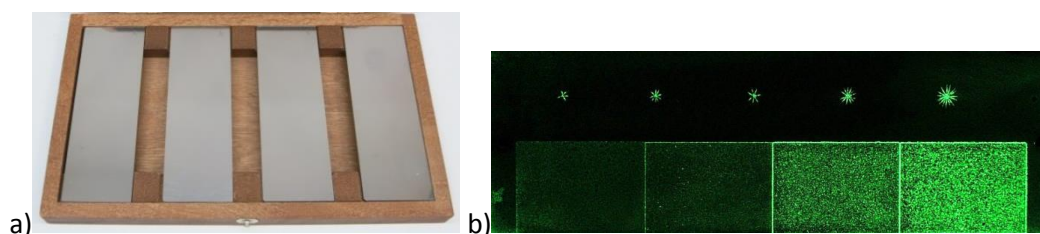


Figura 2.9 – Padrões de sensibilidade. a) tipo 1; b) tipo 2 [18].

Tabela 2.4 – Propriedades de alguns LP [18], [19], [20].

Designação Comercial	Tipo de LP	Sensibilidade (ISO 3452)	Ponto de inflamação [°C]	Viscosidade [mm²/s]	Densidade [g/cm³]
Karl Deutsch KD-Cheek RDP-1	Colorido	2	84	6,6 (20°C)	0,89
Karl Deutsch KD- Cheek FWP-1	Fluorescente (amarelo)	4	93	10,6 (20°C)	0,90
Karl Deutsch KD- Cheek FNP-1	Fluorescente	4	85	–	0,90
Karl Deutsch KD- Cheek HE-1	Fluorescente	–	–	–	–
Screm Technologies FLUXO P125	Colorido (vermelho)	2	> 82	3~3,5 (40°C)	0,86
MagnaFlux ZL-2C	Fluorescente (amarelo esverdeado)	2	> 93	5,9 (38°C)	0,89
MagnaFlux ZL-27A	Fluorescente (amarelo esverdeado)	3	> 93	9,8 (38°C)	0,91
MagnaFlux ZL-37	Fluorescente (amarelo esverdeado)	4	> 93	13,4 (38°C)	0,97
Mr. Chemie MR®67 DL	Fluorescente (vermelho)	2	100	–	1,02
Mr. Chemie MR®67 PS	Espuma fluorescente (vermelho)	2	97	–	–
Mr. Chemie MR®68 C	Fluorescente (vermelho)	2	97	15 (20°C)	0,91
Mr. Chemie MR®68 NF	Fluorescente (vermelho)	2	97	–	0,96
Mr. Chemie MR® 311 - R	Colorido (vermelho)	2	98	–	0,97

2.5 – Força magnética sobre um corpo ferromagnético

Na técnica de END com CB são utilizados equipamentos dedicados para a aplicação de campos magnéticos sobre os provetes a inspecionar, por forma a promover a mobilidade das CB, conforme discutido anteriormente no § 2.3. Alguns equipamentos utilizam ímanes permanentes para a aplicação de campos magnéticos [6], sendo que importa determinar qual a configuração espacial e o número de ímanes mais apropriado. Assim, é necessário conhecer o efeito da aplicação de campos magnéticos sobre uma partícula de ferro (as quais se encontram no núcleo das CB utilizadas), uma vez que a concepção de novos protótipos funcionais para a aplicação de campo magnético depende deste efeito.

Deste modo, quando um corpo ferromagnético se encontra numa região do espaço em que existe um campo magnético, fica sujeito a uma força de natureza magnética cuja direcção é coincidente com as linhas de fluxo do campo. A intensidade desta força, F_{mag} [N], pode ser determinada através da variação da densidade de energia do campo magnético devido à presença do corpo ferromagnético de acordo com a Equação (2.1) [21]:

$$F_{\text{mag}} = \nabla \cdot [(U - U_0) \cdot V] \quad (2.1)$$

Em que ∇ é o operador gradiente, U [J/m³] a densidade de energia na presença do objecto ferromagnético, U_0 [J/m³] a densidade de energia sem o objecto ferromagnético e V [m³] o volume do objecto ferromagnético. Por outro lado, a densidade de energia de um campo magnético, U [J/m³], pode ser determinada através da Equação (2.2):

$$U = \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} \quad (2.2)$$

Em que B [T] é a densidade do fluxo magnético e H [A/m] é a densidade do campo magnético. A densidade do fluxo magnético na ausência de um corpo ferromagnético, B_0 [T], pode ser determinada com recurso à Equação (2.3), em que μ_0 [H/m] é a permeabilidade magnética do vazio:

$$B_0 = \mu_0 \cdot H \quad (2.3)$$

Por sua vez, a densidade do fluxo magnético na presença de um corpo ferromagnético, B [T], pode ser determinada através da Equação (2.4), em que μ_r é a permeabilidade relativa do material ferromagnético.

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \quad (2.4)$$

Para além do material, a permeabilidade relativa depende também fortemente da geometria do corpo considerado. Um objecto cilíndrico, por exemplo, possui uma permeabilidade relativa 1000 vezes superior à de uma esfera do mesmo material. Para um corpo esférico de qualquer material ferromagnético tem-se $\mu_r = 3$. Simplificando a Equação (2.1) para o caso de um corpo esférico, vem que a força magnética a que este fica sujeito é dada pela Equação (2.5):

$$F_{\text{mag}} = \nabla \cdot \left[\left(\frac{1}{2} (3\mu_0 \cdot \vec{H} \cdot \vec{H}) - \frac{1}{2} (\mu_0 \cdot \vec{H} \cdot \vec{H}) \right) \cdot V \right] = \frac{2V}{\mu_0} \cdot B_0 \cdot \frac{dB_0}{dx} \quad (2.5)$$

Analisando a Equação (2.5) verifica-se que a intensidade da força magnética depende não só da intensidade do campo magnético aplicado, como também da taxa de variação espacial do campo magnético aplicado. Deste modo, para um corpo ferromagnético sobre o qual se encontre aplicado um campo magnético intenso mas cuja variação espacial seja nula, não irá sofrer a acção de nenhuma força magnética. Conclui-se deste modo que a configuração espacial dos ímanes permanentes em protótipos funcionais dedicados à técnica de END com CB deve assegurar que a taxa de variação espacial da intensidade do campo magnético criado não é nula.

2.6 – Síntese do capítulo

Neste capítulo apresentou-se uma pesquisa do estado dos desenvolvimentos das técnicas de END utilizadas para a detecção de micro defeitos. Verificou-se ser diminuto o número de publicações científicas nesta área. As técnicas de END existentes, à excepção da técnica com CB, cingem-se a um conjunto muito reduzido de materiais testados e a morfologia de defeito resume-se a defeitos artificiais com uma orientação particularmente favorável à sua detecção. Por oposição, a técnica de END com CB não só apresenta um limiar de detectabilidade mais reduzido, como os defeitos detectados não necessitam de possuir qualquer orientação específica para ser possível a sua detecção.

3 – DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO FUNCIONAL PARA APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO

3.1 – Introdução

Um dos objectivos deste trabalho consistiu no desenvolvimento de um novo protótipo funcional que permitisse a aplicação de um campo magnético de maior intensidade, comparativamente aos protótipos funcionais desenvolvidos em trabalhos anteriores. Este capítulo ocupa-se da descrição desse novo protótipo funcional.

A utilização de um protótipo funcional dedicado aos Ensaios Não Destrutivos (END) com células bacterianas (CB) reside na necessidade de promover a mobilidade destas células, aquando da etapa de penetração nos defeitos, descrita anteriormente no § 2.3. Em desenvolvimentos anteriores da técnica foram criadas diferentes variantes para a aplicação de campo magnético, dos quais se destaca a aplicação de campo magnético triaxial.

No trabalho de Patrick Inácio [6] foram desenvolvidos dois equipamentos dedicados para este efeito, os quais diferiam no modo de aplicação do campo magnético. No caso do equipamento para aplicação de campo magnético triaxial, o campo magnético era criado através da excitação do estator de um motor passo-a-passo. Contudo, foi verificado que a intensidade do campo magnético aplicado conduzia a uma baixa mobilidade das células bacterianas (CB), pelo que foi desenvolvido o equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial. Este recorria a ímanes permanentes com o objectivo de produzir um campo magnético de intensidade superior. Contudo, verificou-se experimentalmente [6] que o campo magnético criado por dois ímanes permanentes idênticos e alinhados frente a frente apresenta uma distribuição parabólica, com um mínimo a meia distância entre os dois ímanes. No gráfico da Figura 3.1 é apresentada a intensidade do campo magnético em função da distância aos ímanes, que são representados esquematicamente pelos rectângulos, em que os pólos norte e sul são representados a azul e vermelho, respectivamente.

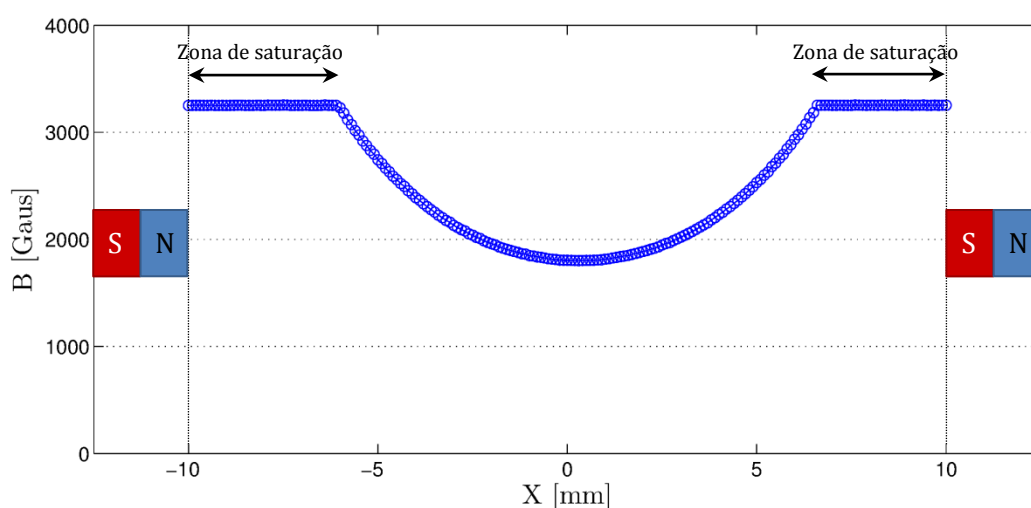


Figura 3.1 – Medição experimental da intensidade do campo magnético, B , em função da distância, X , entre dois ímanes de permanentes colocados frente a frente a uma distância de 20 mm.

Os troços horizontais do gráfico tratam-se de zonas de saturação, dado a intensidade do campo magnético na região adjacente a cada um dos ímanes exceder o limite superior da gama de funcionamento da sonda de efeito de Hall utilizada para a medição experimental (gama de funcionamento de -2500 a 2500 Gauss e sensibilidade de $1,00 \pm 0,02$ mV/Gauss).

Conforme apresentado anteriormente, a intensidade da força, F_{mag} , que actua sobre uma esfera de material ferromagnético pode ser determinada em função da variação da densidade de energia do campo magnético originada pela presença de um objecto ferromagnético (*vide* § 2.5). Analisando a Equação (2.5) conclui-se que a intensidade da força, F_{mag} , é zero quando a derivada do campo magnético, dB_0/dx , é nula, como é o caso do mínimo do gráfico da Figura 3.1 correspondente ao ponto equidistante aos dois ímanes. Deste modo, uma esfera de material ferromagnético colocada a meia distância entre dois ímanes permanentes não fica sujeita a qualquer força magnética criada pelos ímanes, apesar de existir um campo magnético aplicado sobre a esfera.

Verifica-se assim que a utilização de dois ímanes permanentes para promover a mobilidade das CB num provete colocado a meia distância entre os dois ímanes não representa uma boa solução, dado que a intensidade da força magnética aplicada sobre as CB nesta configuração é reduzida ou mesmo nula. Esta constatação foi tida em consideração no desenvolvimento de um novo protótipo funcional que possibilitasse a aplicação de um campo magnético permanente triaxial de elevada intensidade (da ordem de 1000 Gauss), utilizando agora um único íman permanente.

3.2 – Requisitos Funcionais

Numa fase inicial foi realizada a análise dos protótipos funcionais já existentes no laboratório de END do Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI) do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da FCT-UNL dedicados aos END com CB, com o objectivo de definir quais os requisitos funcionais do novo protótipo. Estes são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Requisitos Funcionais do protótipo funcional.

Requisito	Detalhe
Campo magnético triaxial	Pretende-se que o protótipo funcional permita a aplicação de campo magnético no provete, com a finalidade de promover a mobilidade e penetração das células bacterianas nos defeitos.
Variação da frequência do campo	A rotação de um íman permanente em torno do provete possibilita a variação da frequência do campo magnético aplicado.
Facilidade de utilização	O protótipo funcional deve proporcionar uma fácil e rápida colocação do provete para inspecção.
Portabilidade	O protótipo funcional deve apresentar dimensões compactas por forma a facilitar não só o seu transporte para o local dos ensaios, bem como minimizar o espaço requerido para a sua colocação.
Automatização	Com a finalidade de assegurar a repetibilidade dos ensaios, o protótipo funcional automatizado e o seu controlo deve ser efectuado a partir de um computador.
Compatibilidade	Pretende-se que a excitação e alimentação do protótipo funcional sejam compatíveis com o <i>hardware</i> utilizado em outros protótipos funcionais dedicados ao END com CB. O mesmo é válido para o <i>software</i> .
Custo reduzido	O protótipo funcional deve ser modular e utilizar componentes estandardizados com a finalidade de simplificar a sua produção e proporcionar uma solução económica.

3.3 – Concepção do protótipo funcional

Como referido anteriormente, o novo protótipo funcional deve assegurar a aplicação de um campo magnético triaxial sobre o provete. Este tipo de campo pode ser gerado pela criação de um campo magnético num dado plano que se encontre animado de um movimento de rotação em torno de um eixo.

Deste modo, quando um íman descreve uma trajectória circular num dado plano, origina um campo magnético bidireccional nesse plano. Caso o referido plano possua movimento de rotação segundo um eixo normal ao eixo em torno do qual o íman foi inicialmente colocado em rotação, a conjugação dos dois movimentos de rotação origina um campo magnético triaxial. Conjugando as duas velocidades de rotação é ainda possível obter diferentes direcções de aplicação do campo magnético.

Uma vez criado o campo magnético, é necessário que o provete seja colocado de forma a ser sujeito à acção do campo triaxial, ou seja, que o provete se encontre imobilizado em relação ao movimento do íman. É portanto necessário que o suporte dos provetes se encontre imobilizado em relação aos dois movimentos. Assim, este suporte deve encontrar-se desacoplado do movimento do íman, bem como do movimento de rotação do plano em que o íman se encontra.

3.4 – Projecto e produção do protótipo funcional

Uma vez definido conceptualmente o protótipo funcional foi efectuada a sua modelação tridimensional, com a escolha de soluções construtivas que privilegiam a utilização de componentes *standard* e simultaneamente com vista à satisfação dos requisitos funcionais mencionados na Tabela 3.1.

O chassis do protótipo funcional é constituído por uma base metálica, disposta horizontalmente, e duas chapas metálicas verticais, que possuem a finalidade de suportar os restantes elementos da estrutura. Na Figura 3.2 apresenta-se a modelação em SolidWorks do protótipo funcional, encontrando-se identificados os seus principais elementos.

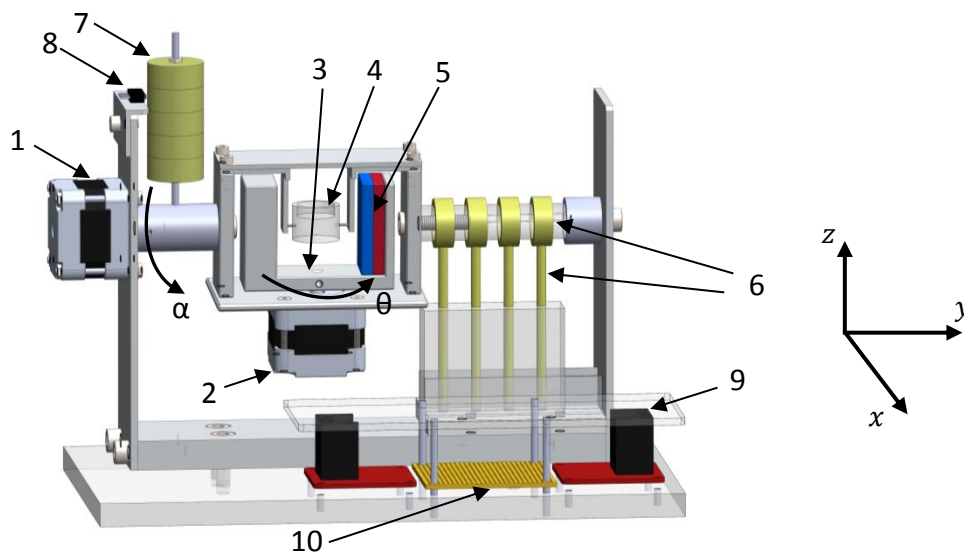


Figura 3.2 – Modelação do protótipo funcional em SolidWorks.

Legenda: 1 – motor bipolar (M1); 2 – motor unipolar (M2); 3 – suporte do íman; 4 – suporte de provetes; 5 – íman neodímio; 6 – sistema de alimentação do motor unipolar; 7 – contrapeso; 8 – sensor fim-de-curso; 9 – driver com chip L298N; 10 – placa de circuitos.

O íman permanente utilizado para criar o campo magnético encontra-se fixo a um suporte em forma de “U”. O movimento de rotação do íman (coordenada θ) é conseguido através da utilização de um motor passo-a-passo unipolar (M2), que coloca em rotação o suporte em forma de “U”. O conjunto central, constituído pelo íman e respectivo suporte, pelo motor M2 e restantes elementos estruturais, é suportado por dois veios horizontais posicionados segundo o eixo Y, e portanto alinhados axialmente. Um dos veios é em alumínio e encontra-se acoplado a um motor passo-a-passo bipolar (M1) e é onde se encontra fixo o contrapeso, enquanto o segundo veio é em acrílico e sobre si encontram-se montados quatro anéis de latão. Para a movimentação dos veios horizontais (coordenada α), que colocam em rotação o conjunto central, foi utilizado o motor M1.

O facto de o motor M2 se mover solidariamente com os veios horizontais constitui uma dificuldade adicional à sua alimentação eléctrica, dado que esta não pode ser efectuada com o recurso a cabos. Deste modo foi necessário conceber um sistema de contacto eléctrico para a alimentação do motor M2. De entre o conjunto de soluções equacionadas, optou-se por uma solução em que a transmissão da corrente eléctrica é conseguida pelo contacto entre anéis e tubos de latão, identificados na Figura 3.2. Os anéis movem-se solidariamente com o veio de acrílico, enquanto os tubos verticais são suportados por um bloco de acrílico acoplado ao chassis do protótipo funcional. São utilizados 4 conjuntos anel/tubo para realizar a alimentação eléctrica de cada uma das fases do motor M2, sendo cada um dos tubos pressionado por uma mola contra o respectivo anel, por forma a garantir a continuidade do contacto eléctrico. Importa referir que tanto o veio (em que se encontram fixos os anéis), como o suporte dos tubos de latão, são em acrílico por forma a garantir o isolamento eléctrico.

Dado que um dos requisitos do protótipo funcional consistia na aplicação de um campo magnético triaxial, foi necessário garantir a imobilização do suporte dos provetes. Com vista à satisfação deste requisito, foi adoptada uma solução construtiva utilizando duas agulhas alinhadas axialmente entre si e segundo o eixo de Y do protótipo funcional. Deste modo foi possível desacoplar a posição do suporte dos provetes do movimento de rotação segundo as coordenadas α e θ , sendo assim assegurada a aplicação de um campo magnético triaxial.

Em consonância com o efectuado para os equipamentos dedicados para a aplicação de campos eléctricos ou magnéticos, apresentados no § 2.3.3, foi igualmente adoptada uma designação para o protótipo funcional para a aplicação de campo magnético triaxial permanente, sendo designado por PF_Btriaxial_permanente. As cotas de atravancamento deste encontram-se identificadas na Figura 3.3, sendo que o peso do protótipo funcional de

24 N. Pelo exposto anteriormente, o novo protótipo de equipamento cumpre os requisitos funcionais inicialmente definidos.

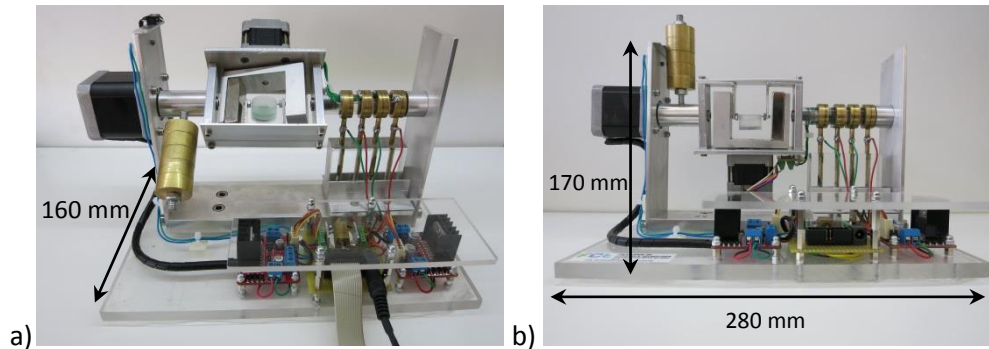


Figura 3.3 – Fotografias do protótipo funcional para aplicação de campo magnético permanente triaxial: a) Vista superior; b) Vista de frente.

3.4.1 – Electrónica e Instrumentação

O motor passo-a-passo utilizado para a movimentação suporte do íman possui 200 passos, enquanto o motor utilizado para movimentar o veio alinhado segundo o eixo Y possui 96 passos. Para o controlo de cada um dos motores passo-a-passo foi utilizado um *driver* com um *chip* L298N. O protótipo funcional possui também um fim-de-curso com a finalidade de permitir definir a posição inicial do protótipo funcional.

Um dos requisitos funcionais definidos consistia na compatibilidade com outros protótipos funcionais dedicados aos END com CB, pelo que para a interface entre o protótipo funcional e o computador foi utilizada uma placa NI USB-6008 da *National Instruments*. Foi ainda produzida uma placa de circuitos (Figura 3.4) para estabelecer as conexões dos elementos necessários à alimentação eléctrica do protótipo funcional e a interface por cabo plano com a placa de aquisição NI USB-6008.

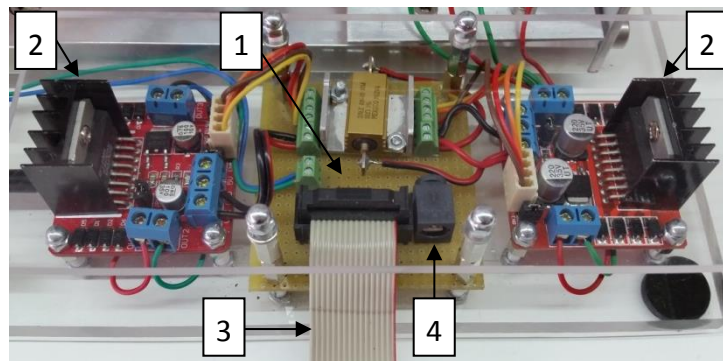


Figura 3.4 – Placa de circuitos e respectivas ligações.

Legenda: 1 – placa de circuitos; 2 – *driver* com *chip* L298N; 3 – cabo plano de interface com a placa NI USB-6008; 4 – alimentação eléctrica do protótipo funcional (12V/1,8A).

A tensão de alimentação do protótipo funcional é de 12 V, sendo a intensidade máxima da corrente eléctrica necessária ao seu funcionamento de 1,8 A, dos quais 1,3 A são correspondentes ao motor M1 e 0,5 A ao motor M2.

3.4.2 – Software

Com a finalidade de efectuar o controlo do protótipo funcional, foi utilizado um *software* desenvolvido em linguagem G, no ambiente LabVIEW da National Instruments. Na Figura 3.5 apresenta-se a interface gráfica do *software* desenvolvido, através da qual é possível seleccionar e prescrever os parâmetros de cada modo de funcionamento do protótipo.

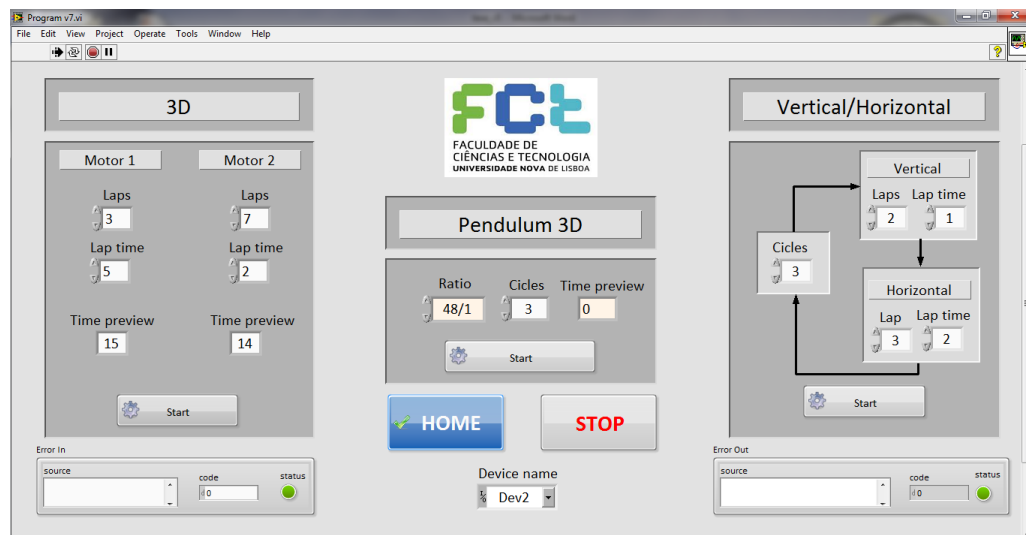


Figura 3.5 – Interface gráfica em LabVIEW para controlo do protótipo funcional.

Foram definidos três modos de funcionamento distintos para o protótipo funcional, sendo eles:

– O **efeito 3D**, em que é aplicado um campo magnético triaxial sobre o provete. É possível controlar independentemente o número de rotações de cada motor, bem como o tempo em que cada motor descreve uma volta. Por conseguinte, é possível variar a frequência de aplicação do campo magnético triaxial. Neste modo de funcionamento ambos os motores apresentam um movimento contínuo, ou seja, a sua rotação não é interrompida nem o sentido da mesma é invertido. Na Figura 3.6 é apresentada, da esquerda para a direita, a sequência de funcionamento deste modo.

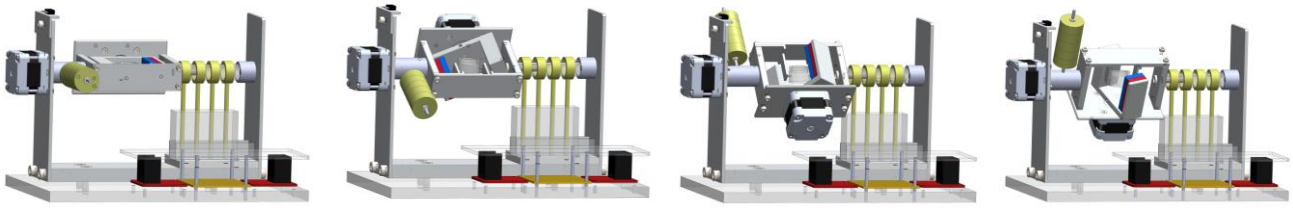


Figura 3.6 – Sequência de funcionamento do modo efeito 3D.

– O **vertical/horizontal**, em que o campo magnético é aplicado segundo um plano horizontal ou segundo um plano vertical. Neste modo é possível definir ciclos de funcionamento, em que cada ciclo corresponde à aplicação de campo magnético vertical e de seguida de campo magnético horizontal, sendo possível definir o número de vezes em que o campo é aplicado em cada direcção. Tal como no modo anterior, é igualmente possível definir o número de rotações que cada motor efectua e a duração de cada rotação completa. Na Figura 3.7 encontra-se, da esquerda para a direita, a sequência de funcionamento deste modo. O modo vertical/horizontal é semelhante ao funcionamento do protótipo funcional desenvolvido por Bruno Mateus [6], que através de dois solenóides possibilitava a aplicação de campo magnético segundo as direcções vertical e horizontal. O novo protótipo desenvolvido possui a vantagem de o intervalo de tempo compreendido entre a aplicação do campo vertical e horizontal ser mais reduzido e de não ser necessária a movimentação do provete.

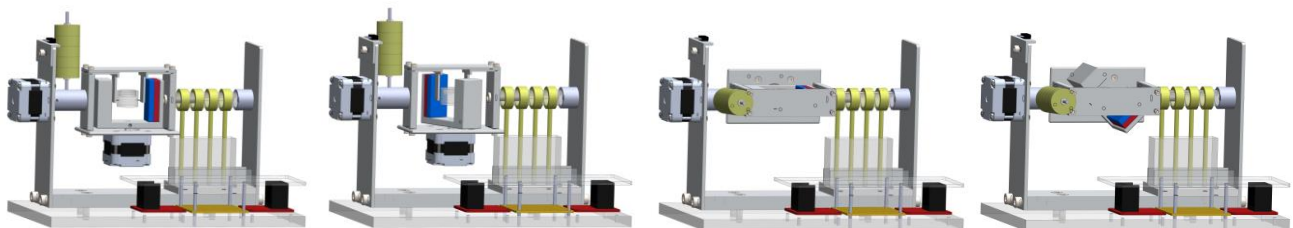


Figura 3.7 – Sequência de funcionamento do modo vertical/horizontal.

– O **pêndulo 3D**, em que o ímã descreve uma semicircunferência, segundo a coordenada θ , primeiro num sentido e de seguida no sentido inverso, enquanto simultaneamente o conjunto central (do qual faz parte o ímã de neodímio) é colocado em rotação segundo a coordenada α . Ambos os motores possuem um movimento pendular, com uma amplitude de 180° , sendo que a velocidade segundo θ (M2) é consideravelmente superior à velocidade segundo α (M1). Foram deste modo estabelecidas as relações de funcionamento, através da definição de diferentes combinações da duração do movimento pendular de cada um dos motores, ou seja, do intervalo de tempo em que cada motor descreve uma amplitude

de 180°. Na Figura 3.8 é apresentada, da esquerda para a direita, a sequência de funcionamento deste modo.

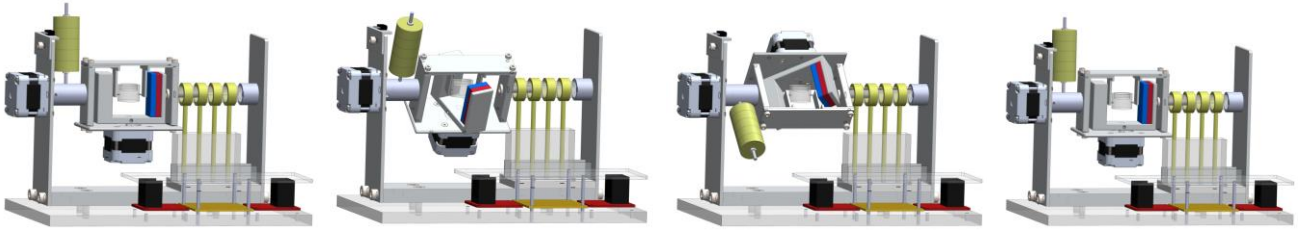


Figura 3.8 – Sequência de funcionamento do modo pêndulo 3D.

As relações de funcionamento definidas encontram-se listadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Definição das relações de funcionamento do modo pêndulo 3D.

Relação	Duração pêndulo M1 (s)	Duração pêndulo M2 (s)
1	48	1
2	96	1
3	96	2
4	192	1
5	192	2

Um ciclo de funcionamento do modo pêndulo 3D corresponde a um movimento pendular completo do motor M1, dado ser este o motor que apresenta o movimento mais lento, sendo que o motor M2 repete o seu movimento pendular até que o motor M1 cesse o seu movimento. Através da prescrição de diferentes velocidades de rotação para cada um dos motores passo-a-passo, foi possível aplicar campos magnéticos com diferentes frequências.

3.5 – Caracterização do protótipo funcional

Com a finalidade de visualizar o percurso tridimensional descrito pelo íman permanente, foram estabelecidas as equações paramétricas que traduzem o seu movimento em função das coordenadas α e θ (definidas na Figura 3.2). Considerando o centro do íman definido pelo ponto P , a sua posição no plano YZ em função de θ pode ser representado pela Equação (3.1):

$$P_{yz}(\theta) = \{0 \quad \cos \theta \quad \sin \theta\} \quad (3.1)$$

Quanto à rotação do íman em torno do eixo Y em função da coordenada α , $R_y(\alpha)$, esta é descrita pela Equação (3.2):

$$R_y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A Figura 3.9 apresenta as coordenadas utilizadas para definição da posição do ponto P no referencial do protótipo funcional.

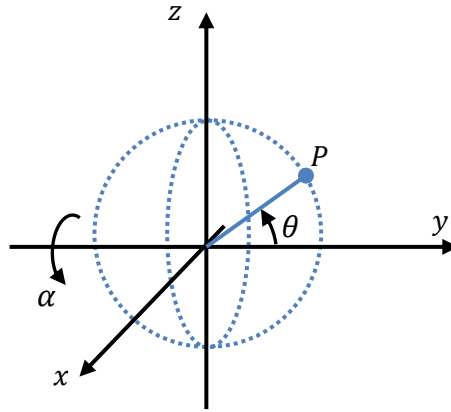


Figura 3.9 – Coordenadas utilizadas para a definição da posição do ponto P .

Deste modo, o movimento tridimensional do íman, em função das coordenadas α e θ , pode ser descrito pela Equação (3.3):

$$P_{xyz}(\alpha, \theta) = R_y \cdot P_{yz}^T = \begin{pmatrix} -\sin \alpha \cdot \sin \theta \\ \cos \theta \\ \sin \theta \cdot \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Uma vez definido o movimento tridimensional do íman através das suas equações paramétricas, foi possível obter a representação gráfica do percurso descrito pelo íman para os diferentes modos de funcionamento do protótipo funcional. Na Figura 3.10 é apresentada a representação correspondente ao percurso descrito pelo íman no modo pêndulo 3D. As representações gráficas das restantes relações de funcionamento são idênticas, apresentando apenas uma maior densidade de linhas correspondente ao facto de o número de movimentos pendulares realizados pelo motor M2 (movimento segundo θ) ser superior.

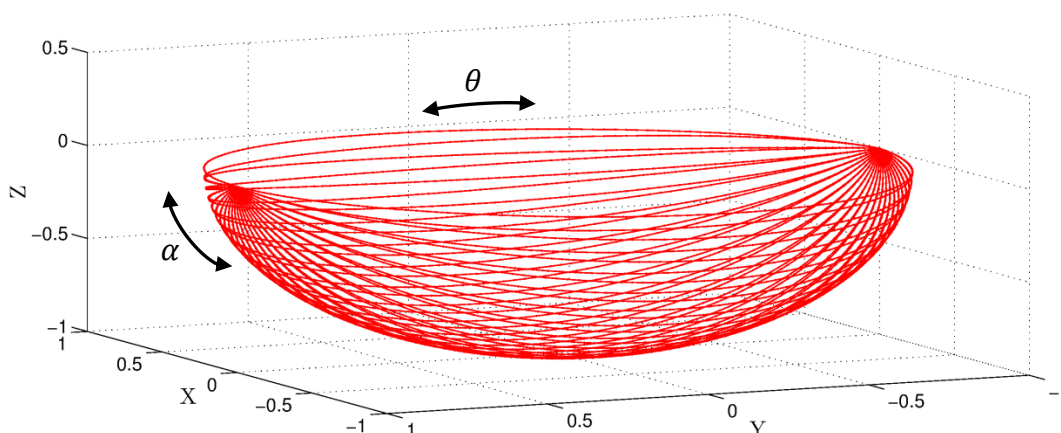


Figura 3.10 – Representação do percurso tridimensional descrito pelo centro do íman no modo pêndulo 3D (relação de funcionamento 1).

Uma vez definida a trajectória descrita pelo íman, interessava também conhecer a intensidade do campo magnético aplicado sobre os provetes. Para o efeito foi utilizada uma sonda de efeito de Hall (gama de funcionamento de -2500 a 2500 Gauss e sensibilidade de $1,00 \pm 0,02$ mV/Gauss), apresentando-se o aparato laboratorial na Figura 3.11. Por forma a caracterizar a distribuição da intensidade do campo magnético no plano em que são colocados os provetes (correspondente ao suporte acrílico dos provetes), foi utilizada uma mesa XY, tendo a sonda de efeito de Hall sido posicionada ao centro do íman segundo o eixo Z.

O varrimento horizontal foi efectuado ao longo do eixo X (direcção normal ao comprimento do íman, c , a uma distância constante da face superior do íman, conforme ilustrado na Figura 3.11b. O íman utilizado (dimensões: $h = 10$ mm; $l = 20$ mm; $c = 40$ mm) para a caracterização do campo magnético é o mesmo que se encontra disposto no protótipo funcional.

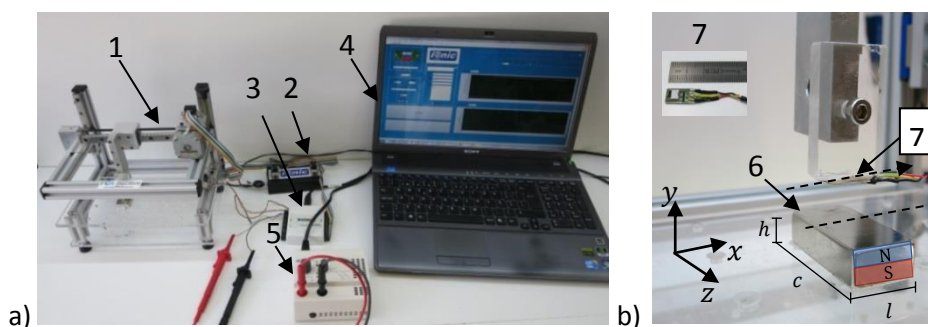


Figura 3.11 – Aparato laboratorial para a medição da intensidade do campo magnético.
a) 1 – Mesa XY; 2 – Caixa com electrónica (mesa XY); 3 – Placa NI USB-6008; 4 – Programa em LabView para aquisição de dados da sonda; 5 – Alimentação eléctrica da sonda de Hall.
b) 6 – Íman de neodímio; 7 – Sonda de efeito de Hall.

O varrimento horizontal (Figura 3.11b) foi repetido para diferentes distâncias, medidas a partir da face superior do íman segundo o eixo Y, tendo sido deste modo determinada a distribuição da intensidade do campo magnético no plano de colocação dos provetes, ou seja, na superfície de um provete colocado no suporte de acrílico do protótipo funcional (ver Figura 3.2). A representação gráfica das medições é apresentada na Figura 3.12, sendo que o sistema de eixos utilizado é coerente com o da Figura 3.9b.

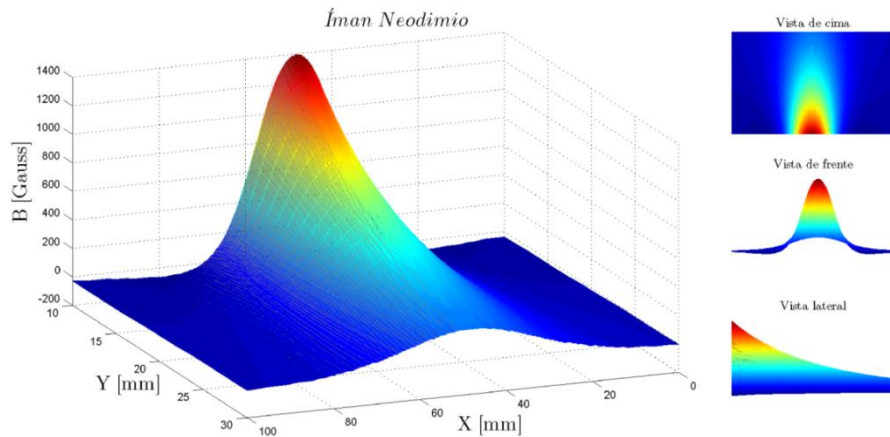


Figura 3.12 – Representação gráfica da intensidade do campo magnético B no plano de colocação dos provetes.

A Figura 3.12 permite conhecer de forma qualitativa a distribuição do campo magnético no plano de colocação dos provetes, não possibilitando contudo a identificação clara da intensidade do campo magnético em função da coordenada X, para as diferentes distâncias à superfície do íman permanente (coordenada Y). Deste modo, na Figura 3.13 é apresentada a intensidade do campo magnético em função da coordenada X, para diferentes distâncias à superfície do íman permanente.

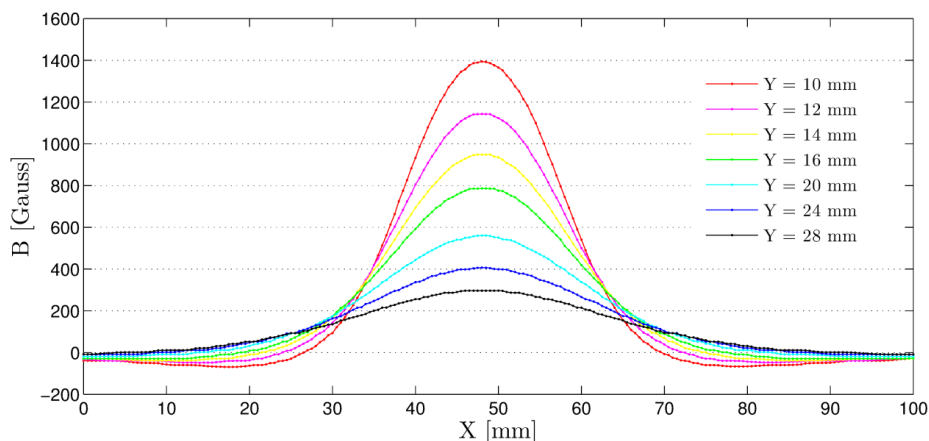


Figura 3.13 – Representação gráfica da intensidade do campo magnético B em função da distância ao íman permanente.

A distância do íman permanente aos provetes, quando colocados no equipamento dedicado desenvolvido, varia entre $Y = 10 \text{ mm}$ e $Y = 28 \text{ mm}$, dependendo do valor da coordenada θ da posição em que o íman se encontre. Da análise da Figura 3.13 decorre que a intensidade do campo magnético a que um provete colocado no protótipo funcional fica sujeito, se encontra compreendida entre aproximadamente 300 e 1400 Gauss, dependendo da região considerado na superfície do provete.

Foi também determinado o decaimento da intensidade do campo magnético criado pelo íman permanente em função da distância à sua face maior (direcção Y), utilizando o aparato laboratorial exposto na Figura 3.11a. Esta medição experimental foi realizada com a sonda de efeito de Hall posicionada ao centro da face maior do íman ($X = 50 \text{ mm}$), sendo deslocada ao longo o eixo Y a partir da face do íman. Verificou-se que a intensidade do campo magnético apresenta um decaimento exponencial com a distância ao íman permanente, conforme a Figura 3.12 permitia antever, sendo agora possível quantificar a intensidade do campo magnético em função da distância à face maior do íman. A representação gráfica da medição experimental encontra-se na Figura 3.14, sendo o sistema de eixos utilizado coerente com o da Figura 3.9b.

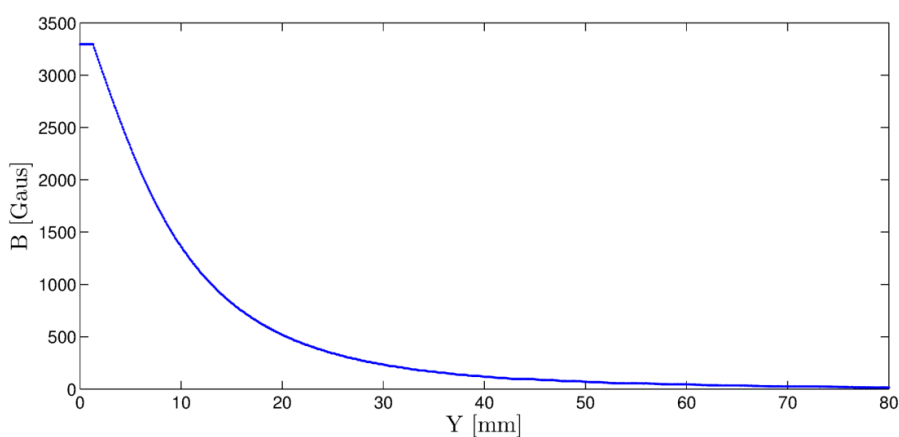


Figura 3.14 – Representação gráfica da intensidade do campo magnético em função da distância ao íman permanente.

Foi ainda efectuado um conjunto de medições experimentais com a finalidade de quantificar a intensidade do campo magnético, aplicado sobre um provete colocado no equipamento dedicado, para diferentes velocidades de rotação do íman permanente segundo a coordenada θ . Deste modo, foi caracterizado o campo magnético, apresentando-se na Figura 3.15 o aparato laboratorial utilizado.

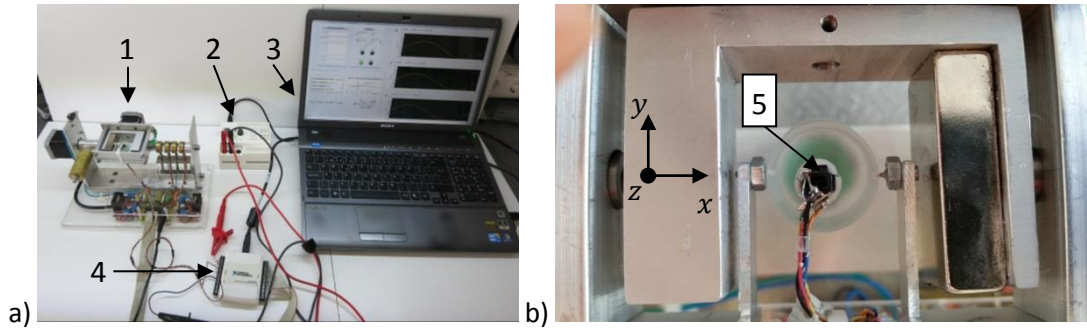


Figura 3.15 – Aparato laboratorial para a medição da variação da intensidade do campo magnético aplicado pelo protótipo funcional em funcionamento.

a) 1 – Protótipo funcional; 2 – Alimentação eléctrica da sonda de Hall; 3 – Programa em LabView para aquisição de dados da sonda; 4 – Placa NI USB-6008. b) 5 – Sonda de efeito de Hall.

Para efectuar estas medições foi utilizada uma sonda constituída por três sensores de efeito de Hall dispostos segundo três planos ortogonais entre si, permitindo deste modo a medição da intensidade do campo magnético segundo as direcções X, Y e Z. A gama de funcionamento da sonda situa-se entre os -750 e os 750 Gauss, sendo a sensibilidade de $2,50 \pm 0,05$ mV/Gauss. A sonda foi colocada no suporte dos provetes conforme representado na Figura 3.15b, encontrando-se o motor M1 (movimento segundo α) imobilizado, dado os cabos da sonda não permitirem a rotação simultânea segundo as coordenadas α e θ . Os resultados obtidos para diferentes frequências de rotação do íman são apresentados da Figura 3.16 à Figura 3.18.

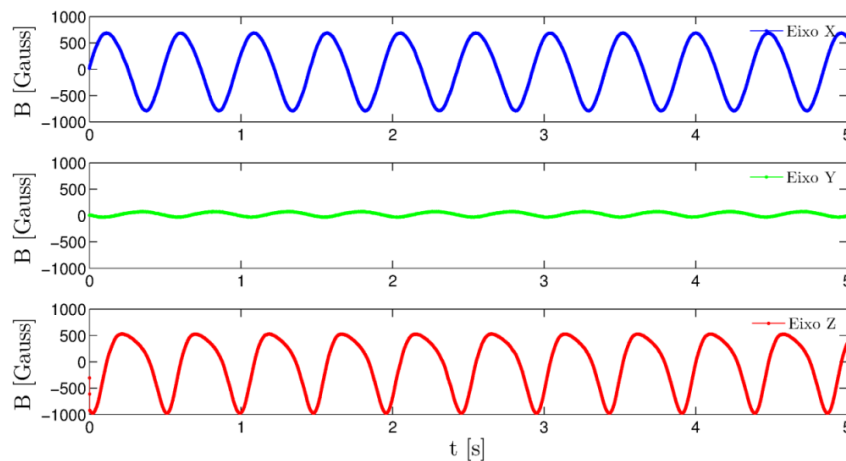


Figura 3.16 – Representação gráfica da intensidade do campo magnético segundo os eixos X, Y, Z em função do tempo, para $\omega = 2$ rev/s.

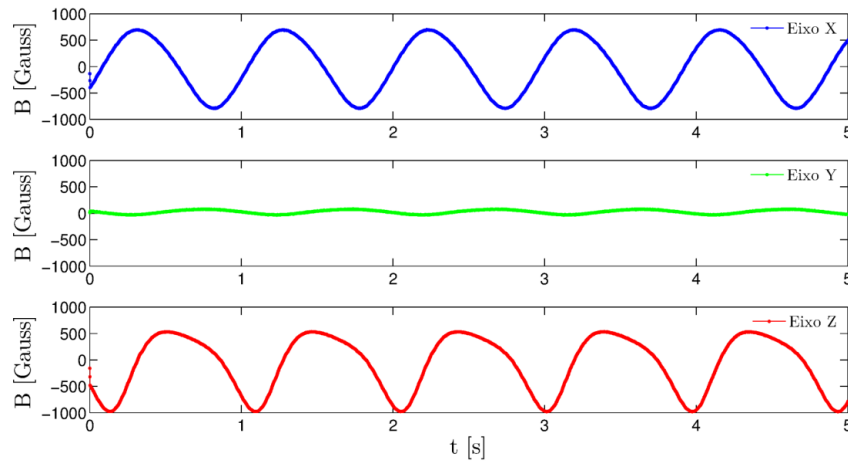


Figura 3.17 – Representação gráfica da intensidade do campo magnético segundo os eixos X, Y, Z em função do tempo, para $\omega = 1 \text{ rev/s}$.

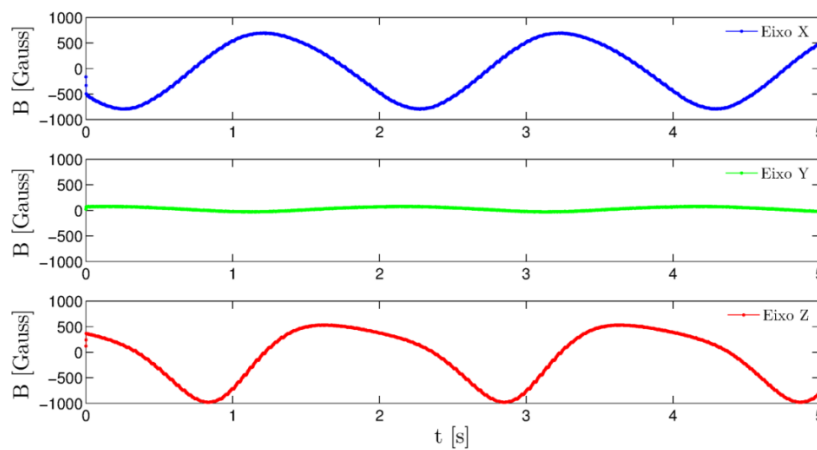


Figura 3.18 – Representação gráfica da intensidade do campo magnético segundo os eixos X, Y, Z em função do tempo, para $\omega = 0,5 \text{ rev/s}$.

As medições apresentadas foram efectuadas com o motor 2 em rotação contínua, ou seja, no modo de funcionamento efeito 3D (*vide* § 3.4.2). Verificou-se que o campo magnético aplicado pelo protótipo funcional possui uma variação aproximadamente sinusoidal segundo as direcções X e Z, para o caso em que o motor responsável pela rotação segundo α se encontra imobilizado. É precisamente pelo facto deste movimento não existir que a intensidade do campo magnético medido segundo a direcção Y é aproximadamente constante e igual a zero. Assim, pelo facto de não existir movimento segundo α , o íman permanente encontrava-se sempre posicionado paralelamente ao sensor de efeito de Hall disposto segundo a direcção Y (Figura 3.15b), pelo que o campo magnético existente não possuía nenhuma componente nesta direcção. Importa referir que para o modo 3D e par o modo pêndulo 3D, esta situação não se verifica, dado que a rotação segundo α conduz ao aparecimento da componente do campo magnético segundo a direcção Y.

A ausência de simetria da intensidade do campo magnético segundo o eixo Z deve-se ao desalinhamento do suporte dos provetes (Figura 3.2) segundo este eixo, o que explica o facto de o gráfico segundo a direcção Z ser ligeiramente diferente do gráfico referente à direcção X. O movimento do íman em torno do provete origina assim uma taxa de variação espacial do campo magnético, dB_0/dx , não nula em todo o espaço, sendo deste modo assegurada a aplicação de uma força magnética sobre as CB que promove mobilidade destas.

3.6 – Equipamentos Acessórios

Na etapa de deposição das CB, existe uma variante da aplicação da suspensão sobre o provete que consiste na imersão do mesmo na suspensão de CB. Para o efeito foi desenvolvido um acessório constituído por um recipiente metálico cilíndrico (diâmetro igual a 16 mm e altura de 16 mm) que permite ajustar a altura do provete no copo que contém a suspensão de CB. Para tal, possui uma guia linear vertical e uma porca de aperto manual, por forma a ajustar a posição vertical do provete, o qual é suportado por uma pinça metálica. O protótipo funcional possibilita também que seja aplicado um campo eléctrico sobre o provete, sendo para tal necessário utilizar uma fonte de alta tensão, conectando a peça ao pólo negativo/positivo e o copo ao pólo positivo/negativo, caso as CB possuam potencial eléctrico positivo/negativo respectivamente. Deste modo, as CB são sujeitas a forças de natureza eléctrica, atraindo-as para o provete de teste.

Um dos objectivos deste trabalho consistiu na simulação numérica do movimento das CB. Interessava portanto correlacionar a amplitude do movimento das células com a intensidade dos campos eléctricos aplicados sobre as mesmas. Por forma a quantificar alguns dos parâmetros do modelo analítico do movimento das CB (carga das CB e amortecimento) foi necessário determinar previamente qual o deslocamento que as CB apresentavam quando sobre si foram aplicados campos eléctricos de diferente intensidade. Para a aplicação de campos eléctricos sobre as CB foi necessário conceber e produzir um protótipo funcional que possibilitasse a aplicação de campos eléctricos e ainda que a sua dimensão fosse tal que possibilitasse observar ao microscópio óptico o deslocamento das células devido à acção do campo eléctrico. A solução encontrada para o protótipo funcional consistiu numa base acrílica e em duas chapas de alumínio, dispostas como a Figura 3.19 ilustra.

Uma das chapas possui dois rasgos por forma a ajustar a distância entre estas. Através da utilização de uma fonte de alta tensão foi possível aplicar uma diferença de potencial entre as

duas chapas (eléctrodos), utilizando para o efeito dois cabos, um conectado ao pólo positivo e o outro ao pólo negativo da fonte de alta tensão, criando assim um campo eléctrico na zona compreendida entre as duas chapas. Colocando uma gota de suspensão de CB e recorrendo a um microscópio óptico foi possível determinar o deslocamento das CB para diferentes valores do campo eléctrico aplicado.

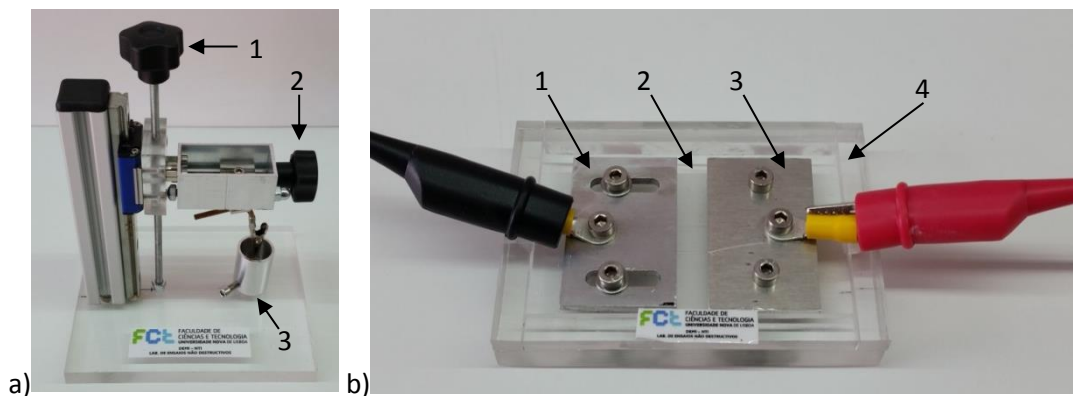


Figura 3.19 – Equipamentos acessórios.

a) acessório para inspecção por imersão do provete: 1 – porca manual para ajuste em altura; 2 – porca manual para ajuste horizontal; 3 – copo para a colocação das CB; b) acessório para aplicação de campo eléctrico: 1 – eléctrodo positivo ajustável; 2 – zona de colocação das CB; 3 – eléctrodo negativo; 4 – base acrílica.

3.7 – Síntese do Capítulo

Neste capítulo foi descrito o projecto, produção e caracterização de um novo protótipo funcional para aplicação de campo magnético triaxial permanente satisfazendo os requisitos funcionais inicialmente definidos. De forma resumida, o protótipo funcional recorre a dois motores passo-a-passo que permitem criar um movimento tridimensional de um íman de neodímio em relação a um provete de teste, o qual se encontra imobilizado. Foi projectada e produzida a electrónica e instrumentação do protótipo funcional, bem como um programa de computador em *Graphical User Interface* (GUI), para efectuar o controlo do protótipo funcional. Importa referir que a utilização de um íman para gerar o campo magnético aplicado pelo protótipo funcional dificulta a inspecção de materiais ferromagnéticos, visto estes serem atraídos pelo íman permanente. Tal pode ser solucionado fixando convenientemente o provete. A caracterização do campo magnético aplicado pelo protótipo funcional foi efectuada com recurso a sondas de efeito de Hall. Foram ainda apresentados dois novos protótipos funcionais auxiliares à técnica de END com CB.

4 – SIMULAÇÃO ANALÍTICA

4.1 – Introdução

Este capítulo trata da simulação analítica do movimento das células bacterianas (CB). É apresentado o modelo do movimento das células bacterianas (CB) que traduz o efeito de um campo externo, eléctrico ou magnético, no comportamento das mesmas. É descrita a determinação da carga da bactéria utilizada no capítulo da validação experimental da técnica de Ensaio Não Destrutivo (END) com CB e a simulação do movimento das CB para diferentes condições de ensaio, nomeadamente, intensidade e frequência do campo eléctrico aplicado. No final são apresentadas algumas conclusões sobre o modelo analítico utilizado para a modelação do movimento das CB.

Com a finalidade de melhorar o conhecimento processual da técnica de Ensaios Não Destrutivos (END) com CB, nomeadamente no que respeita ao comportamento dinâmico das CB, foi necessário desenvolver um modelo do movimento das referidas células. Este modelo traduz a influência dos parâmetros que regem o fenómeno físico do movimento das CB e do campo, eléctrico ou magnético, aplicado sobre as células. No trabalho de Patrick Inácio foi proposto um modelo analítico do movimento, que permitiu determinar a posição de uma bactéria para um dado instante de tempo, em função de diferentes parâmetros, nomeadamente, das propriedades das CB e do meio em que estas se encontram, bem como da frequência e intensidade do campo externo aplicado. Neste trabalho foi desenvolvido o referido modelo, com foco na determinação experimental da carga da bactéria.

4.2 – Modelo analítico do movimento das células bacterianas

As CB possuem diversas morfologias, sendo que a bactéria *Rhodococcus erythropolis*, utilizada para a validação experimental da técnica de END com CB, possui a forma *coccus*, correspondente a uma geometria esférica [6]. Como hipótese simplificativa do modelo analítico, a bactéria foi tratada como uma partícula pontual, portanto sem dimensões. Esta simplificação é razoável face à dimensão das CB (cerca de 0,92 µm de diâmetro), sendo que os termos referentes à rotação da CB são nulos devido à geometria esférica. As CB utilizadas nos ensaios experimentais possuem complexos de ferro, sendo que a intensidade das forças, eléctricas ou magnéticas, originadas pelos campos aplicados se encontra correlacionada com a percentagem de ferro existente na sua constituição. Por conseguinte, este trata-se de um dos parâmetros do modelo analítico do movimento das CB que agora se apresenta.

O modelo utilizado para o estudo do efeito da aplicação de campos eléctricos ou magnéticos na mobilidade das CB foi inicialmente proposto no trabalho de Patrick Inácio [6]. Este modelo considera as CB como cargas pontuais sobre as quais actuam um conjunto de forças, a saber:

– Uma força, eléctrica ou magnética, F [N], dependendo da natureza do campo aplicado, que promove o movimento das CB e a sua penetração nas discontinuidades. Esta força traduz o efeito que o campo aplicado produz sobre a carga pontual (bactéria). Para o caso de um campo eléctrico, a intensidade desta força é calculada através da Equação (4.1):

$$F = q \cdot E \quad (4.1)$$

Em que q [C] é a carga da bactéria e E [kV/m] a intensidade do campo eléctrico aplicado sobre as CB.

– Uma força de atrito, resultante da interacção entre as CB e a suspensão aquosa em que estas se encontram. Dado a suspensão se tratar de um meio viscoso contínuo e as CB apresentarem um movimento do tipo browniano², o número de Reynolds associado ao movimento é baixo, tratando-se de regime laminar. Nestas condições é possível determinar a força de atrito que actua sobre uma bactéria aplicando a lei de Stokes:

$$F_a = 6\pi r \cdot \mu \cdot \dot{x} \quad (4.2)$$

Em que F_a [N] é a força de atrito, r [m] o raio da bactéria, μ [N.s/m²] a viscosidade dinâmica e \dot{x} [m/s] a velocidade da bactéria.

– Uma força de inércia, $F_{inércia}$ [N], traduzida pela a Equação (4.3):

$$F_{inércia} = m \cdot \ddot{x} \quad (4.3)$$

Em que m [kg] é a massa da CB e \ddot{x} [m/s²] é a aceleração da CB. Na Figura 4.1 é apresentado o diagrama de corpo livre de uma bactéria.

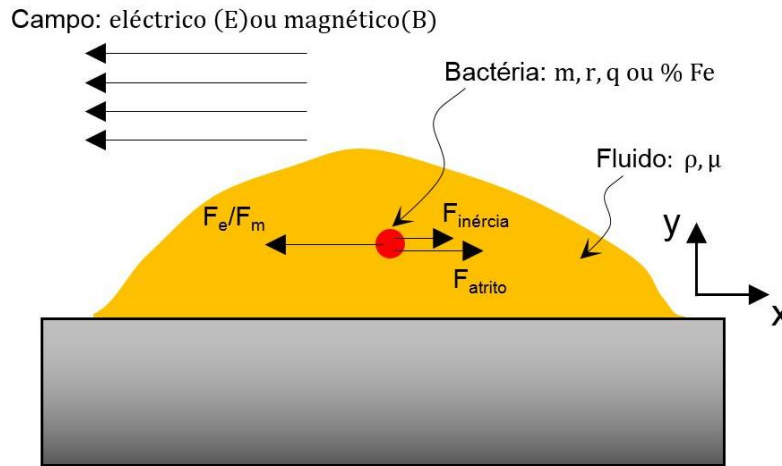


Figura 4.1 – Diagrama de corpo livre de uma CB [6].

² Consiste num movimento aleatório contínuo de partículas sólidas microscópicas quando em suspensão num fluido [22].

Efectuando o equilíbrio de forças segundo a direcção X, obtém-se a equação de equilíbrio dinâmico para uma bactéria:

$$-q \cdot E \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \ddot{x} + 6\pi r \cdot \mu \cdot \dot{x} = 0 \quad (4.4)$$

Pelo facto de o campo eléctrico ou magnético aplicado ser de natureza sinusoidal, a força resultante da aplicação do campo é também sinusoidal. Reescrevendo a Equação (4.4), obtém-se:

$$m \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 6\pi r \cdot \mu \cdot \frac{\partial x}{\partial t} = q \cdot E \cdot \cos(\omega t) \quad (4.5)$$

Reescrevendo a Equação (4.5) de forma simplificada resulta:

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} = F \cdot \cos(\omega t) \quad (4.6)$$

Em que as novas variáveis possuem o seguinte significado:

$$M = m; C = 6\pi r \cdot \mu; F = q \cdot E$$

A Equação (4.6) é diferencial de 2ª ordem, sendo portanto possível obter a sua solução analítica. Para resolução da equação foi considerado que a bactéria se encontrava em repouso no instante inicial e na origem do sistema de coordenadas e, ou seja, $x(0) = 0$, $\dot{x}(0) = 0$ e $\ddot{x}(0) = 0$. A solução analítica da Equação (4.6) é dada por:

$$x(t, q, C, E, M) = \frac{-C^2 \cdot q \cdot E \cdot \cos(\omega t) + C^2 \cdot q \cdot E - M \cdot q \cdot E \cdot \omega^2 \cdot e^{-\left(\frac{-Ct}{M}\right)} - C \cdot M \cdot q \cdot E \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) + M^2 \cdot q \cdot E \cdot \omega^2}{C^3 \cdot \omega + C \cdot M^2 \cdot \omega^3} \quad (4.7)$$

Em que x corresponde à posição de uma CB para o instante de tempo t. Conhecidos os parâmetros da Equação (4.7) é possível prever a posição, x, em que uma bactéria se encontra para um dado instante de tempo, t, quando é aplicado um campo eléctrico com uma intensidade, E, e frequência, ω .

Em alternativa à resolução analítica da equação diferencial (Equação (4.5)), pode ser utilizado um método numérico para a determinação da sua solução. Deste modo, foi utilizado um método de integração directa no tempo, o qual avalia a equação de equilíbrio dinâmico para cada instante de tempo (passo considerado), assumindo que os valores de x, \dot{x} e \ddot{x} são conhecidos para as iterações anteriores e para a iteração actual. São assim obtidos os valores de x, \dot{x} e \ddot{x} para a iteração seguinte [23]. Foi utilizado o método de Newmark para a resolução da Equação (4.5). Uma vez escolhidos os parâmetros adequados, este método é

incondicionalmente estável, permitindo obter a solução da equação com muito boa precisão [23]. A resolução numérica da equação diferencial permite que sejam utilizados outros modelos de atrito, em que a força de atrito, F_a , não dependa linearmente da velocidade, ou seja, permite a resolução de uma equação diferencial sem solução analítica. Conhecidos os parâmetros do modelo do movimento das CB, é possível prever qual o deslocamento que uma bactéria sofre quando sobre si é aplicado um campo, eléctrico ou magnético, com uma determinada intensidade e frequência. O código utilizado para a resolução numérica da equação diferencial do movimento das CB encontra-se no Anexo 2.

4.3 – Determinação da carga das células bacterianas

No trabalho de Patrick Inácio [6], foi assumida a carga da bactéria, q , tendo sido esse valor utilizado para a determinação do deslocamento das CB a partir da Equação (4.7). Neste trabalho procurou-se determinar experimentalmente a carga da bactéria, tendo-se para o efeito medido o deslocamento das CB para diferentes intensidades do campo eléctrico aplicado. A determinação experimental do deslocamento das CB foi efectuada no Instituto de Biotecnologia e Bioengenharia (IBB), no Instituto Superior Técnico (IST). Para a aplicação de campo eléctrico sobre as CB foi utilizado o Acessório para a aplicação de campo eléctrico (*vide* § 3.6), colocado sobre a platina de um microscópio óptico com aquisição de imagem, conforme ilustrado na Figura 4.2.

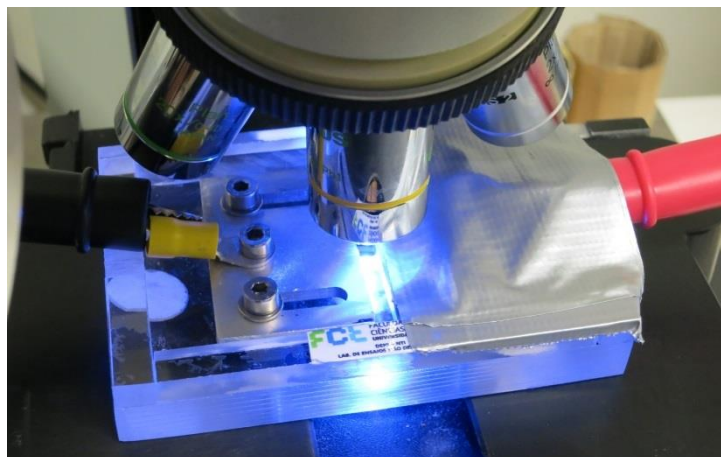


Figura 4.2 – Ensaio de medição do deslocamento das CB com aplicação de campo eléctrico.

Com base nas imagens obtidas com o microscópio óptico determinou-se experimentalmente o deslocamento das CB para campos eléctricos de 500 kV/m e 1000 kV/m de intensidade, respectivamente. Na Figura 4.3 apresentam-se as imagens do movimento das CB utilizadas para determinar o seu deslocamento em função da intensidade do campo eléctrico aplicado. O procedimento de ensaio consistiu na utilização de uma fonte de alta tensão para aplicar uma diferença de potencial entre os dois eléctrodos do Acessório de equipamento para a aplicação de campo eléctrico, durante o intervalo de tempo em que foi capturada a imagem do movimento das CB com o microscópio óptico. Deste modo foi possível medir experimentalmente a distância percorrida pelas CB durante o intervalo de tempo de aplicação do campo eléctrico aplicado, que por sua vez correspondeu ao tempo de captura da imagem pelo microscópio óptico (tempo de exposição).

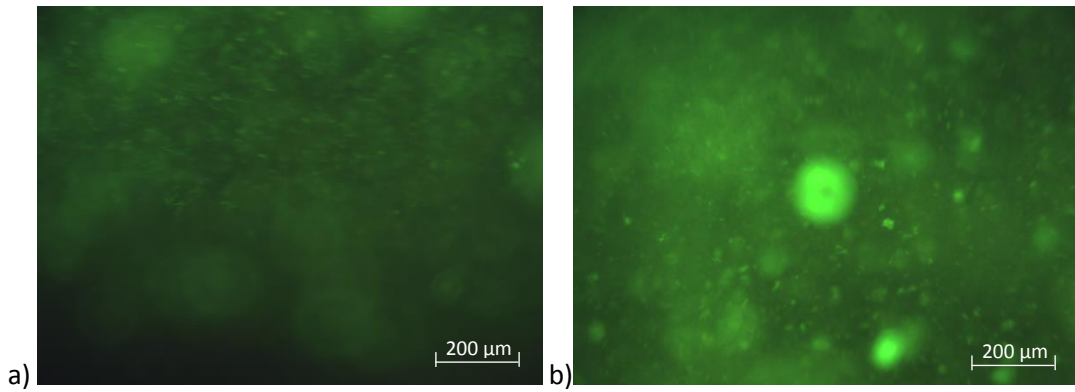


Figura 4.3 – Movimento das CB observado ao microscópio óptico.
a) $E = 500 \text{ kV/m}$; b) $E = 1000 \text{ kV/m}$.

O campo eléctrico aplicado foi de intensidade constante, pelo que a Equação (4.6) não é aplicável para determinação da carga da bactéria, uma vez que a força aplicada não era sinusoidal. Deste modo, a equação diferencial que traduz o movimento das CB deve contemplar esta alteração, sendo agora expressa pela Equação (4.8):

$$M.\ddot{x} + C.\dot{x} = q.E \quad (4.8)$$

Em que as variáveis possuem o significado indicado anteriormente. Assumindo novamente condições iniciais nulas, a solução analítica da Equação (4.8) é dada por:

$$x(t) = \frac{q.E.\left(M.\left(e^{-\frac{Ct}{M}} - 1\right) + C.t\right)}{C^2} \quad (4.9)$$

A Equação (4.9) permite determinar a posição de uma bactéria, x , para qualquer instante de tempo, t , pertencente ao intervalo de aplicação do campo eléctrico. Na Tabela 4.1 encontram-se os valores numéricos das variáveis da Equação (4.9).

Tabela 4.1 – Variáveis do modelo analítico.

Variável	Valor numérico	Comentário
r	$0,46 \times 10^{-6} \text{ m}$	Este valor é referente ao raio da bactéria <i>Rhodococcus erythropolis</i> , utilizada nos ensaios experimentais.
μ	$1 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$	Foi assumido como estimativa que a viscosidade dinâmica da suspensão das CB é igual à da água.
q	–	É o que se pretende determinar.
E	$E = \Delta V/d$	Este valor depende da diferença de potencial aplicada entre os eléctrodos do equipamento e do afastamento dos eléctrodos.
M	$5,42 \times 10^{-16} \text{ kg}$	Massa de uma CB, assumindo densidade igual à da água.
C	$9,42 \times 10^{-9} \text{ N.s/m}$	Este valor resulta da estimativa da viscosidade dinâmica do meio, que se assumiu igual à da água.

Nota: ΔV corresponde à diferença de potencial aplicada entre os eléctrodos e d é a distância entre os mesmos.

Uma vez que à excepção da carga da bactéria se conheciam os restantes parâmetros da Equação (4.9), foi possível determinar o valor numérico da referida carga. Assim, resolvendo a Equação (4.9) em ordem à carga da bactéria, foi obtido o seu valor para duas intensidade distintas do campo eléctrico aplicado (500 kV/m e 1000 kV/m), sendo os resultados obtidos apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Deslocamento das CB medido experimentalmente.

Tensão aplicada [kV]	Distância entre os eléctrodos [mm]	Intensidade do campo eléctrico [kV/m]	Deslocamento medido experimentalmente [μm]	Carga da bactéria [C] (calculada)
4	8	500	13,9	$1,63 \times 10^{-19}$
8	8	1000	17,4	$1,02 \times 10^{-19}$

Os valores obtidos para a carga da bactéria com a aplicação de campos de intensidades diferentes são distintos, o que não se deveria verificar. De facto, a carga da bactéria obtida em ambos os casos deveria ser igual, independentemente da intensidade do campo eléctrico, uma vez que foram utilizadas as mesmas CB nos dois ensaios, tendo sido apenas alterada a intensidade do campo eléctrico aplicado.

A discrepância entre os valores numéricos obtidos para a carga da bactéria podem ter origem em erros cometidos na medição de diferentes grandezas, nomeadamente:

- A intensidade do campo eléctrico aplicado sobre as CB. Não foi possível confirmar se a diferença de potencial aplicada, entre os dois eléctrodos do acessório para a aplicação de campo eléctrico correspondia efectivamente ao valor prescrito na fonte de alta tensão.

- Do deslocamento da bactéria. Pelo facto de existir um atraso entre a aplicação do campo eléctrico e a visualização do movimento das CB, ou seja, a aplicação do campo eléctrico e a visualização do movimento das CB não ocorre simultaneamente, as CB podem possuir um deslocamento que não é identificado aquando da observação ao microscópio óptico;

Acresce ainda o facto de os valores da massa da bactéria e da viscosidade do meio utilizados no modelo analítico corresponderem a valores não determinados experimentalmente, tratando-se de aproximações da realidade pelo que constituem fontes de erro adicionais.

Com a finalidade de obter uma estimativa para a carga da bactéria e na ausência de um melhor critério, foi considerado o valor médio das cargas obtidas para os ensaios realizados, ou seja, $q = 1,33 \times 10^{-19}$ C, que é da ordem de grandeza da carga de um electrão. A partir deste conhecimento é possível representar graficamente (Figura 4.4) a posição de uma bactéria, x , em função do tempo, t , durante o qual é aplicado o campo eléctrico sobre a suspensão de CB.

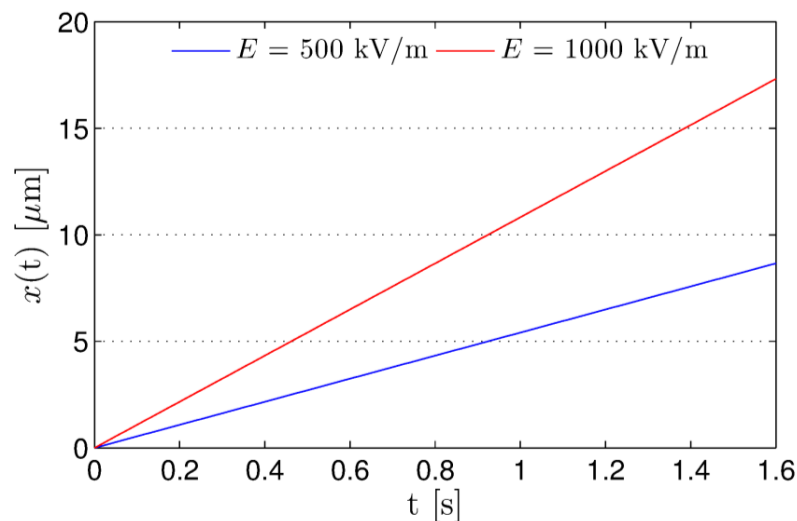


Figura 4.4 – Representação gráfica do deslocamento das CB em função do tempo.

Analisando o gráfico da Figura 4.4 verificou-se que o deslocamento de uma bactéria possui uma relação aproximadamente linear com o tempo, o que significa que o termo exponencial

da Equação (4.9) é praticamente nulo, o que significa que o termo associado ao amortecimento do modelo, C , é o preponderante face à massa da bactéria, m , sendo várias ordens de grandeza superior. Deste modo verificou-se que a massa da bactéria possui importância reduzida no modelo do movimento.

A partir do conhecimento aproximado da carga da bactéria foi simulado o movimento de uma bactéria para o caso em que o campo aplicado é sinusoidal. Com efeito, recorrendo à Equação (4.7) foi obtida a representação gráfica da amplitude do movimento de uma bactéria em função do tempo para diferentes frequências do campo eléctrico aplicado. Os valores numéricos dos parâmetros da equação diferencial considerados foram anteriormente apresentados na Tabela 4.1. Na Figura 4.5 e na Figura 4.6 apresenta-se a representação gráfica da amplitude do movimento da bactéria em função do tempo.

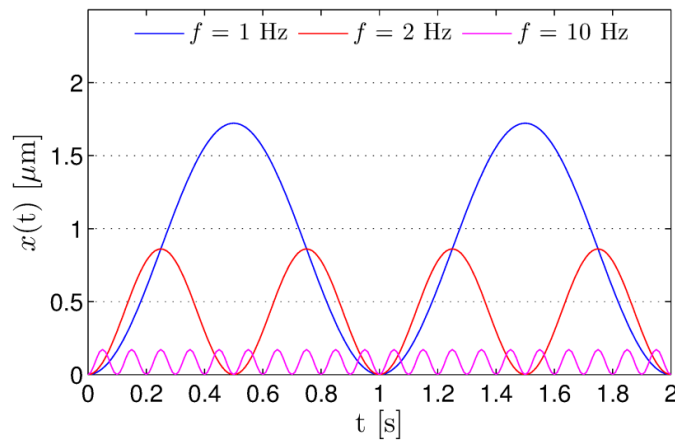


Figura 4.5 – Representação gráfica da amplitude do movimento da bactéria, x , em função do tempo, t , para $E = 500$ kV/m.

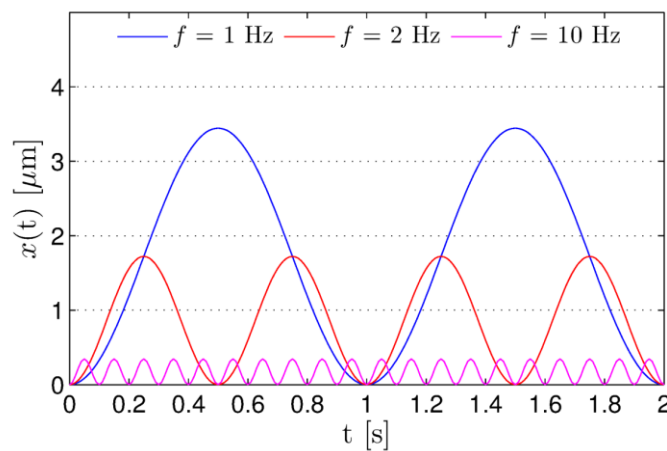


Figura 4.6 – Representação gráfica da amplitude do movimento da bactéria, x , em função do tempo, t , para $E = 1000$ kV/m.

Da simulação efectuada concluiu-se que a amplitude do movimento da bactéria aumenta com o incremento da frequência do campo eléctrico aplicado. Considerando a mesma intensidade do campo eléctrico aplicado, verificou-se que para a gama de frequência considerada o deslocamento da bactéria é inferior ao caso em que o campo eléctrico aplicado é constante.

4.4 – Síntese do Capítulo

Neste capítulo foi exposto o modelo analítico do movimento das CB, determinada experimentalmente a carga aproximada de uma bactéria e efectuada a simulação do movimento das CB para diferentes intensidades e frequências do campo eléctrico aplicado.

Verificou-se experimentalmente que a massa da bactéria possui uma importância reduzida no modelo analítico do movimento, sendo o seu efeito desprezável face aos restantes termos da equação diferencial que traduz o movimento das CB. Este resultado conjuntamente com o facto de o valor determinado para a carga da bactéria ser da ordem de grandeza da de um electrão, sugere que o modelo utilizado pode não ser o mais apropriado para a modelação do fenómeno físico em estudo. Com efeito, esta incapacidade do modelo pode significar uma inadequação da mecânica vectorial newtoniana face à natureza das interacções existentes entre as CB, os defeitos do material e os campos externos aplicados.

5 – VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

5.1 – Introdução

Neste capítulo são caracterizados os provetes (§ 5.2) e apresentadas as células bacterianas (CB) utilizadas nos ensaios experimentais (§ 5.3). No § 5.4 é descrito o procedimento experimental. São apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais da técnica de Ensaios Não Destrutivos (END) com CB para cada um dos materiais testados (§ 5.5), bem como os resultados dos ensaios experimentais com a técnica de END com líquidos penetrantes (LP) (§ 5.6). A análise dos resultados experimentais é apresentada no § 5.7 e a síntese do capítulo encontra-se no § 5.8.

5.2 – Caracterização dos provetes

5.2.1 – Materiais ensaiados

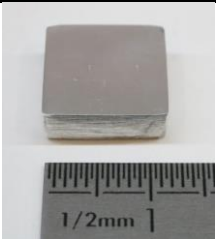
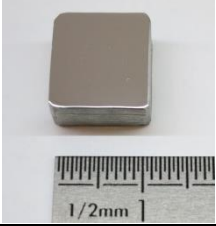
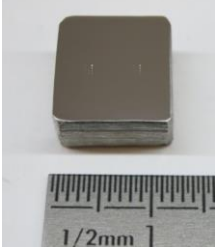
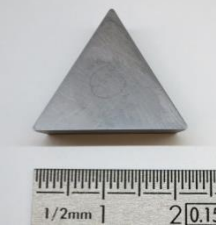
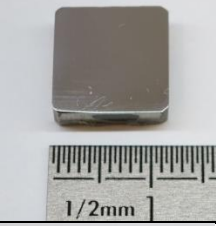
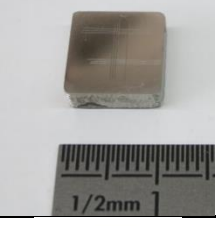
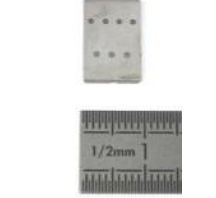
Por forma a expandir a gama de materiais testados com a técnica de END com CB, dando continuidade ao trabalho iniciado por Patrick Inácio [6], foi produzido um conjunto alargado de provetes de materiais ainda não testados com a técnica. Os materiais foram seleccionados pelo seu interesse em aplicações industriais, tendo sido testados maioritariamente materiais metálicos e também alguns poliméricos. Na Tabela 5.1 encontram-se algumas das propriedades físicas, mecânicas e eléctricas destes materiais.

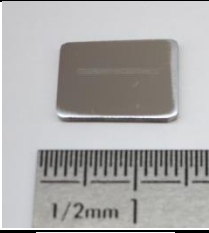
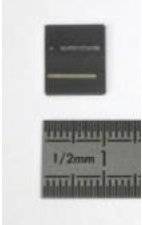
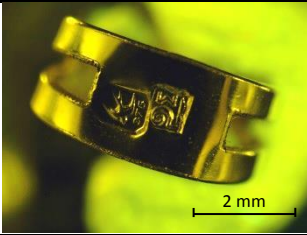


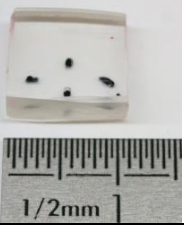
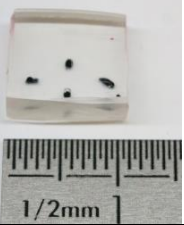
Tabela 5.1 – Propriedades dos materiais testados [24].

Material	Densidade [kg/m ³]	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rotura [MPa]	Condutividade eléctrica [S.m]
AA 1100	2700	103	110	3,33x10 ⁷
AISI 316L	8000	560	290	1,33x10 ⁶
Titânio (<i>grade 5</i>)	4510	880	950	1,92x10 ⁶
Níquel-titânio	6450	100	754 – 960	1,32x10 ⁶
Carboneto de tungsténio	15700	–	344	1,25x10 ⁶ – 1,89x10 ⁶
Ouro (18 quilates)	19300	–	125	4,26x10 ⁷
Cobre	7764	33,3	210	5,88x10 ⁷
ABS	1050	13 – 65	23 – 49	1,39x10 ⁻¹⁸
Lentes oftálmicas (poli-carbonato)	1290	49 – 156	27 – 156	1,81x10 ⁻¹⁸

A caracterização dos provetes utilizados nos ensaios experimentais encontra-se na Tabela 5.2. Os provetes de teste foram produzidos de acordo com a metodologia utilizada por Diogo Carvalho [5]. Os provetes possuem uma forma quadrangular, com cerca de 12 mm de lado, sendo polidos por forma a tornar a sua superfície tão isenta de riscos quanto possível. Após o polimento foram produzidos defeitos do tipo risco, sendo a sua produção descrita de seguida. Foram ainda testados provetes com outras geometrias de defeitos (não padronizadas), nomeadamente defeitos em provetes com soldadura laser e defeitos resultantes de operações de fresamento e cunhagem. Em adição aos materiais que constam na Tabela 5.2, foi produzido um conjunto muito mais alargado de provetes em outros materiais (*vide* Anexo 1), os quais ficam disponíveis para ensaios futuros.

Tabela 5.2 – Caracterização dos provetes utilizados nos ensaios experimentais.

Material	Acabamento superficial	Morfologia de defeito	Fotografia
AA 1100	Polimento	Micro indentação.	
AISI 316L	Polimento	Micro indentação.	
		Nano indentação.	
Carboneto de tungstênio	Pulverometalurgia	Micro indentação.	
Titânio (<i>grade 5</i>)	Polimento	Micro indentação.	
	Polimento	Tipo risco	
	Soldadura laser	Fissuras radiais	

Níquel-titânio	Polimento	Tipo risco	
	Soldadura laser	Fissura radial e rugosidade	
Ouro (18 quilates)	Cunhagem e fresagem	Desconhecida	
Cobre	Polimento	Micro indentação.	
ABS	Polimento	Micro indentação.	
Lentes oftálmicas	—	Micro indentação.	
	—	Tipo risco	

5.2.2 – Defeitos de micro indentação

À semelhança do que foi realizado em desenvolvimentos anteriores da técnica [3], [5], [6], uma das metodologias utilizadas para a produção de defeitos padrão consistiu na produção de micro indentações. O procedimento seguido foi semelhante à medição de microdurezas Vickers, tendo sido utilizado um microdurómetro Mitutoyo HM-112 e variado o valor da carga aplicada pelo indentador por forma a produzir micro defeitos piramidais de dimensões variadas. A associação entre a carga aplicada pelo indentador e a designação do defeito padrão é apresentada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Defeitos padrão e cargas correspondentes.

Carga [N]	10	5	3	2	1	0,5	0,25	0,1
Defeito Padrão	A	B	C	D	E	F	G	H

Em cada provete foram produzidas duas matrizes de defeitos padrão idênticas (Figura 5.1a), utilizando um indentador Vickers. Este trata-se de uma pirâmide de base quadrangular, pelo que as dimensões das indentações produzidas são usualmente caracterizadas através da medição, utilizando um microscópio óptico, das diagonais planares da base. Conhecido o comprimento das duas diagonais e dado que duas faces opostas da pirâmide formam um ângulo de 136° entre si, foi determinada a dimensão do lado da base de cada pirâmide (L [μm]), bem como da sua profundidade (P [μm]), utilizando a Equação (5.1).

$$L = P \cdot 2 \cdot \tan\left(\frac{136}{2}\right) \quad (5.1)$$

As micro indentações encontram-se organizadas na matriz de defeitos por forma a que um defeito de menor dimensão se encontre sempre adjacente a um defeito maior, devido aos motivos discutidos no § 2.3.6. Na matriz de defeitos as indentações encontram-se distânciadas entre si de 300 μm , garantindo deste modo que duas indentações adjacentes não se intersectam. A organização dos diferentes defeitos na matriz, a morfologia e dimensões características dos defeitos são apresentadas na Figura 5.1.

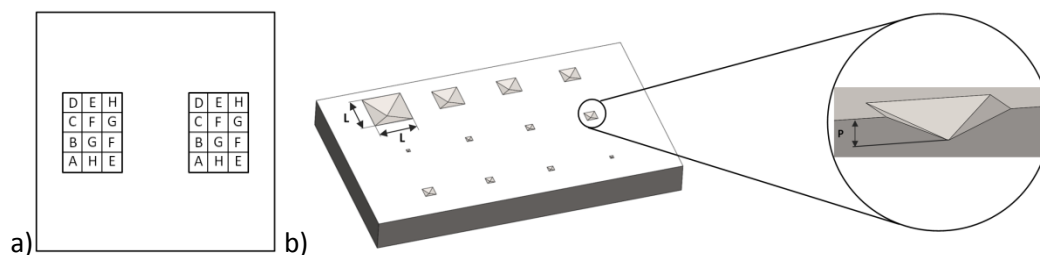


Figura 5.1 – Matrizes de micro indentações: a) disposição dos defeitos padrão nas matrizes de defeitos e sua localização no provete; b) morfologia dos defeitos.

Na Tabela 5.4 encontram-se as dimensões dos defeitos produzidos por micro indentação em cada um dos materiais utilizados.

Tabela 5.4 – Dimensões dos defeitos padrão.

Material	Dimensões do defeito L [μm] / P [μm]							
	A	B	C	D	E	F	G	H
AA 1100	114,4/ 23,1	79,9/ 16,1	62,3/ 12,6	50,7/ 10,3	36,5/ 7,4	25,9/ 5,2	19,4/ 3,9	11,1/ 2,2
AISI 316L	71,8/ 14,5	51,2/ 10,4	39,5/ 8,0	30,9/ 6,24	21,8/ 4,4	15,6/ 3,2	11,1/ 2,3	5,9/ 1,2
Titânio (grade 5)	55,5/ 11,2	38,5/ 7,8	29,7/ 6,0	24,0/ 4,9	17,0/ 3,4	11,9/ 2,4	8,5/ 1,7	4,8/ 1,0
Cobre	101,0/ 20,4	70,3/ 14,2	54,1/ 10,9	44,3/ 9,0	30,6/ 6,2	21,8/ 4,4	15,4/ 3,1	8,7/ 1,8
Carboneto tungsténio	24,2/ 4,9	16,6/ 3,4	13,6/ 2,8	9,7/ 2,0	-	-	-	-
AISI 316L brasado	97,2/ 19,6	55,0/ 11,1	44,2/ 8,9	35,1/ 7,1	23,2/ 4,7	18,1/ 3,7	11,9/ 2,4	7,1/ 1,4
ABS	-	-	-	-	89,6/ 18,1	62,4/ 12,6	44,4/ 9,0	26,7/ 5,4

Pelo facto de cada provete possuir mais do que uma matriz, existe mais do que um tamanho de defeito padrão (A a H), sendo que as dimensões (L [μm] / P [μm]) apresentadas para cada tamanho de defeito se referem aos maiores defeitos de cada tamanho (A a H). Foi assim adoptado um critério conservador, o qual garante que nunca se considera que foi identificado um defeito com dimensões (L [μm] / P [μm]) inferiores às que realmente possui.

5.2.3 – Defeitos de nano indentação

Um dos objectivos deste trabalho consistiu em reavaliar o limiar de detectabilidade da técnica de END com CB, pelo que foi testado um provete contendo uma matriz de nano indentações. Este provete foi produzido no Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra (CEMUC), tendo sido inicialmente polido e posteriormente produzida a matriz de nano indentações com um indentador Berkovich. Este consiste numa pirâmide com três lados, habitualmente utilizado para a medição de propriedades mecânicas à nanoescala, sendo a designação de cada defeito padrão em função da carga aplicada apresentada na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Nano indentações e cargas correspondentes.

Carga [mN]	150	125	116,7	108,3	100	91,7	83,3	75	66,7	58,3	50
Defeito Padrão	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	H1	I1	J1	L1

Uma vez conhecida a área projectada da pirâmide, $A [\mu\text{m}^2]$, (a partir da medição da altura e da base do triângulo projectado), foi possível determinar a altura da pirâmide, $h [\mu\text{m}]$, recorrendo à Equação (5.2) [25].

$$A = 24,675h^2 + 0,562h + 0,003216 \quad (5.2)$$

A área da pirâmide para a menor nano indentação é de $A = 3,7 \mu\text{m}^2$ (lado de $5,3 \mu\text{m}$) e a altura igual a $h = 0,4 \mu\text{m}$. A organização dos diferentes tamanhos de defeitos na matriz seguiu a metodologia da matriz de micro defeitos, na qual um defeito de menor dimensão se encontra sempre próximo de um defeito maior, conforme ilustrado pela Figura 5.2. No caso do provete com nano indentações foi produzida uma única matriz de defeitos, sendo o espaçamento entre os centros de duas indentações consecutivas de $25 \mu\text{m}$.

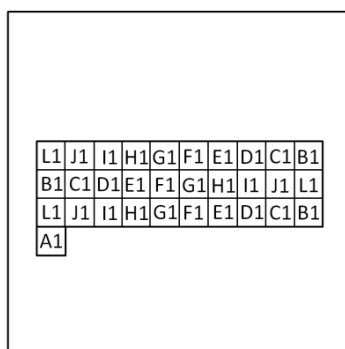


Figura 5.2 – Representação esquemática da matriz de nano indentações.

5.2.4 – Defeitos do tipo risco

Em desenvolvimentos anteriores da técnica de END com CB [6] foi verificado que as células aderem e se alinham preferencialmente segundo irregularidades da superfície dos provetes, resultantes do polimento. Por este motivo, foram produzidos defeitos padronizados com esta morfologia, tendo sido utilizada para o efeito uma mesa XYZ [26] para movimentar uma agulha formando um ângulo de aproximadamente 45° com a direcção normal à superfície do provete (Figura 5.3b). Quando pressionada contra a superfície do provete e feita deslocar ao longo desta, a agulha permitiu criar defeitos do tipo risco na superfície do provete. Utilizando o aparato laboratorial da Figura 5.3a e controlando a carga aplicada, foram produzidos defeitos com diferentes dimensões (largura e profundidade).

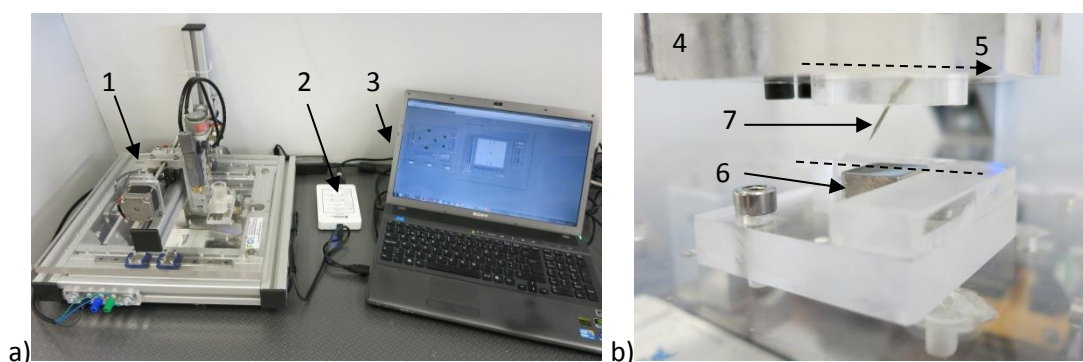


Figura 5.3 – Produção de defeitos do tipo risco.

a) Aparato laboratorial: 1 – Mesa XYZ; 2 – Placa de aquisição NI myDAQ; 3 – Programa em LabView para produção dos defeitos; b) Pormenor do aparato laboratorial: 4 – Suporte móvel da agulha; 5 – Direcção de avanço do suporte; 6 – Provette; 7 – Agulha.

Utilizando este procedimento foram aplicadas cargas de 0,4; 0,6 e 1,2 N, para criar defeitos do tipo risco de diferentes dimensões, sendo a associação da carga aplicada à designação do defeito efectuada na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Defeitos do tipo risco e cargas correspondentes.

Carga [N]	1,2	0,6	0,4	1,2	0,6	0,4
Defeito Padrão	H1	H2	H3	V1	V2	V3

Os defeitos encontram-se dispostos em forma de matriz, de modo semelhante aos defeitos de micro indentação, conforme representado na Figura 5.4.

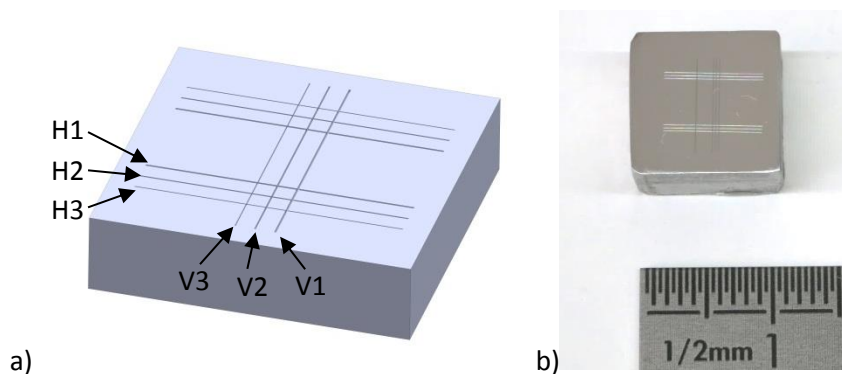


Figura 5.4 – Defeitos do tipo risco.

a) representação esquemática da disposição dos defeitos; b) fotografia de um provete.

Os materiais testados com esta morfologia de defeito encontram-se listados na Tabela 5.2. A caracterização dos defeitos do tipo risco foi efectuada através da medição experimental da rugosidade superficial dos provetes. Para o efeito foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo Surftest 301, sendo o aparato laboratorial apresentado na Figura 5.5.

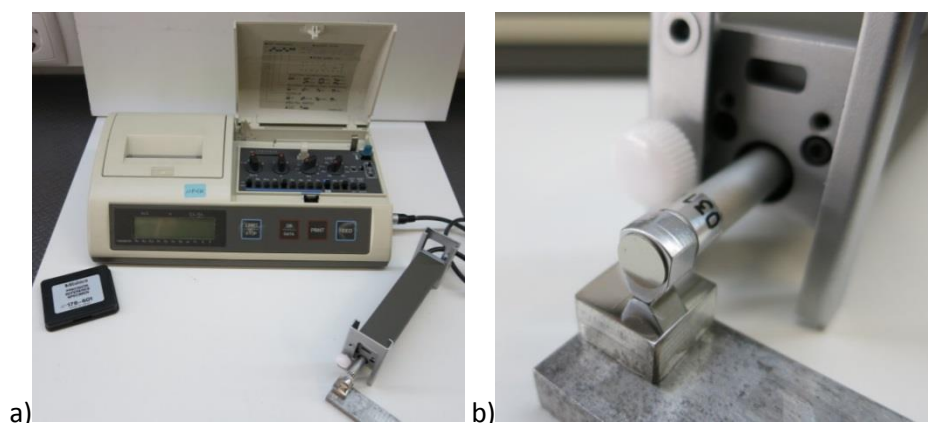


Figura 5.5 – Caracterização dos defeitos do tipo risco.

a) Aparato laboratorial utilizado; b) Pormenor do rugosímetro.

Na Tabela 5.7 apresenta-se o valor máximo da rugosidade medida experimentalmente para cada provete, correspondente à profundidade do defeito do tipo risco produzido com a maior carga aplicada (*vide* Tabela 5.6). No Anexo 3 encontram-se os gráficos dos ensaios experimentais da medição da rugosidade de um conjunto de três riscos de cada um dos provetes.

Tabela 5.7 – Rugosidade máxima de cada provete.

Material	AISI 316L	Titânio (<i>grade 5</i>)	Níquel- titânio
Rugosidade máxima [μm]	2,1	2,9	0,5

5.2.5 – Defeitos com outras morfologias

Para além dos defeitos padrão produzidos foram também ensaiados provetes com diferentes morfologias de defeitos, relativamente aos quais se desconhecia à partida qual a sua localização, dimensão ou morfologia, ou mesmo a sua existência. As morfologias testadas foram as superfícies resultantes de operações de cunhagem, fresamento, soldadura laser e fissuras de padrões de sensibilidade (tipo 1) da técnica de END por LP, que na perspectiva da aplicação da técnica de END com CB podem constituir potenciais defeitos. O ensaio destes provetes teve como objectivo avaliar a capacidade da técnica de END com CB para a detecção de defeitos com morfologias diferentes dos defeitos produzidos por indentação, sendo que os materiais testados se encontram listados na Tabela 5.2.

5.3 – Células bacterianas utilizadas nos ensaios experimentais

As CB constituem um elemento essencial da técnica de END para a detecção de micro defeitos superficiais, condicionando de forma determinante o sucesso dos ensaios experimentais. No trabalho de Patrick Inácio [6], a bactéria *Rhodococcus erythropolis* DCL14, com potencial positivo ou negativo, foi a que conduziu à obtenção de melhores resultados, ou seja, a que possibilitou a detecção dos defeitos padrão de menor dimensão para os materiais testados, independentemente do protótipo funcional utilizado. Deste modo optou-se pela utilização desta bactéria para os ensaios experimentais, sendo as suas principais propriedades apresentadas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Propriedades das CB utilizadas nos ensaios [6].

Designação	Propriedades eléctricas/magnéticas	Diâmetro [μm]	Condições de sobrevivência [°C]	Fonte de Carbono
<i>Rhodococcus erythropolis</i>	Eléctrica	0,92	24 – 35	Etanol ou hexadecano

5.4 – Procedimento experimental

Nos ensaios realizados com a técnica de END com CB foi utilizada a metodologia de aplicação anteriormente descrita no § 2.3.2, tendo sido utilizados diferentes protótipos funcionais para a aplicação de campos eléctricos e magnéticos sobre os provetes.

A metodologia de aplicação da técnica consistiu assim nas seguintes etapas:

- 1 – Identificação da área a inspecionar com um microscópio óptico;
- 2 – Limpeza da superfície do provete com recurso a Ultra-Sons (US) e com etanol;
- 3 – Deposição das CB sobre o provete de teste (Figura 5.6a);
- 4 – Penetração e aderência. Nesta etapa foram utilizadas diferentes variantes para promover a mobilidade e penetração das CB nos defeitos, a saber: deposição das CB sem a aplicação de campos; aplicação de campo eléctrico; aplicação de campo magnético (Figura 5.6b). Para todos os ensaios realizados o tempo de penetração foi de 4 minutos.
- 5 – Remoção do excesso de CB, utilizando panos Kimtech Science (Figura 5.6c);
- 7 – Inspeção e interpretação, através da observação dos provetes com um microscópio óptico (Figura 5.6d);
- 8 – Limpeza e esterilização da peça, através do recurso a uma tina ultra-sons (tempo de aplicação igual a 90 s) e da aplicação de etanol a 70% (v/v) sobre o provete.

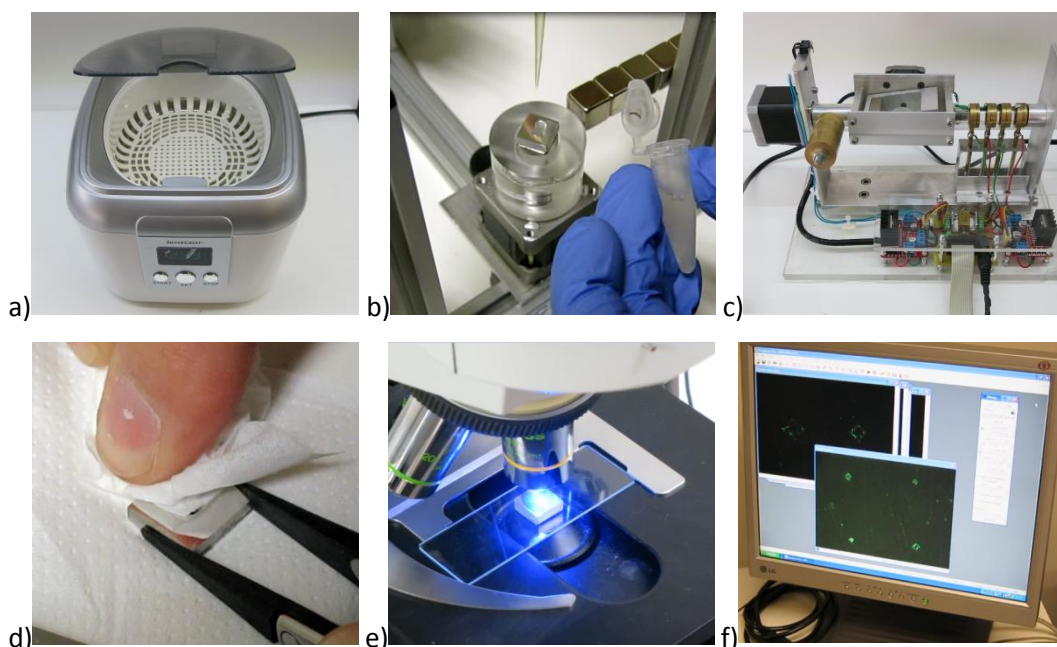


Figura 5.6 – Etapas da metodologia de aplicação da técnica:

- a) limpeza com US; b) deposição; c) aplicação de campo magnético; d) remoção do excesso; e) observação com microscópio óptico; f) interpretação dos resultados.

Importa referir que cada variante da etapa 4 descrita anteriormente corresponde a um ensaio, ou seja, apenas uma das variantes é aplicada por ensaio. Contudo, cada um dos provetes pode ser ensaiado mais do que uma vez sem prejuízo do rigor dos ensaios, desde que sejam repetidas a totalidade das etapas da metodologia de aplicação da técnica e verificada a ausência de CB na superfície do provete previamente à realização de um novo ensaio.

5.5 – Ensaaios experimentais com células bacterianas

A planificação dos ensaios experimentais com a técnica de END com CB é apresentada na Tabela 5.9. Os ensaios experimentais foram realizados no Instituto de Biotecnologia e Bioengenharia (IBB), no Instituto Superior Técnico (IST). Para a identificação dos equipamentos dedicados para a aplicação de campos eléctricos e magnéticos é utilizada a designação adoptada anteriormente neste trabalho (*vide* § 2.3.3 e § 3.4)³.

Tabela 5.9 – Planificação dos ensaios experimentais com CB.

Material	Tipo de defeito	Sequência de ensaios	Bactéria
AA 1100	Micro indentações	A, B, C, D	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -
AISI 316L	Micro indentações	A, C	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -
	Nano indentações	A, B, C, D	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -
Carboneto de tungsténio	Micro indentações	A, C	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -
Titânio (<i>grade</i> 5)	Tipo risco	A, C, D	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -
	Soldadura laser	A	<i>Rhodococcus erythropolis</i> +
Níquel-titânio	Tipo risco	A, C	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -
	Soldadura laser	A	<i>Rhodococcus erythropolis</i> +
Ouro (18 quilates)	Desconhecido	A	<i>Rhodococcus erythropolis</i> +
AISI 316L brasado	Micro indentações	A, B	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -
Lentes oftálmicas	Micro indentações/ Tipo risco	A, B	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -
Padrões de sensibilidade	Fissura	A	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -
			<i>Rhodococcus erythropolis</i> +

Legenda: A – sem aplicação de campo eléctrico ou magnético; B – PF_Btriaxial;
C – PF_Btriaxial_permanente; D – PF_eléctrico.

³PF_HeV: Equipamento de campo magnético H e V.

PF_eléctrico: Equipamento para aplicação de campo eléctrico.

PF_Btriaxial: Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial (ímanes de neodímio).

PF_Btriaxial_permanente: Protótipo funcional para a aplicação de campo magnético triaxial permanente.

5.5.1 – AA 1100

A liga AA 1100 já fora testada com a técnica de END com CB no trabalho de Patrick Inácio [6], contudo os resultados dos ensaios não se revelaram conclusivos. Por este motivo e com a finalidade de validar o novo protótipo funcional desenvolvido para a aplicação de campo magnético permanente triaxial, procedeu-se à realização de novos ensaios neste material. Foi utilizada a bactéria *Rhodococcus erythropolis* com potencial negativo, sendo os resultados dos ensaios apresentados na Figura 5.7.

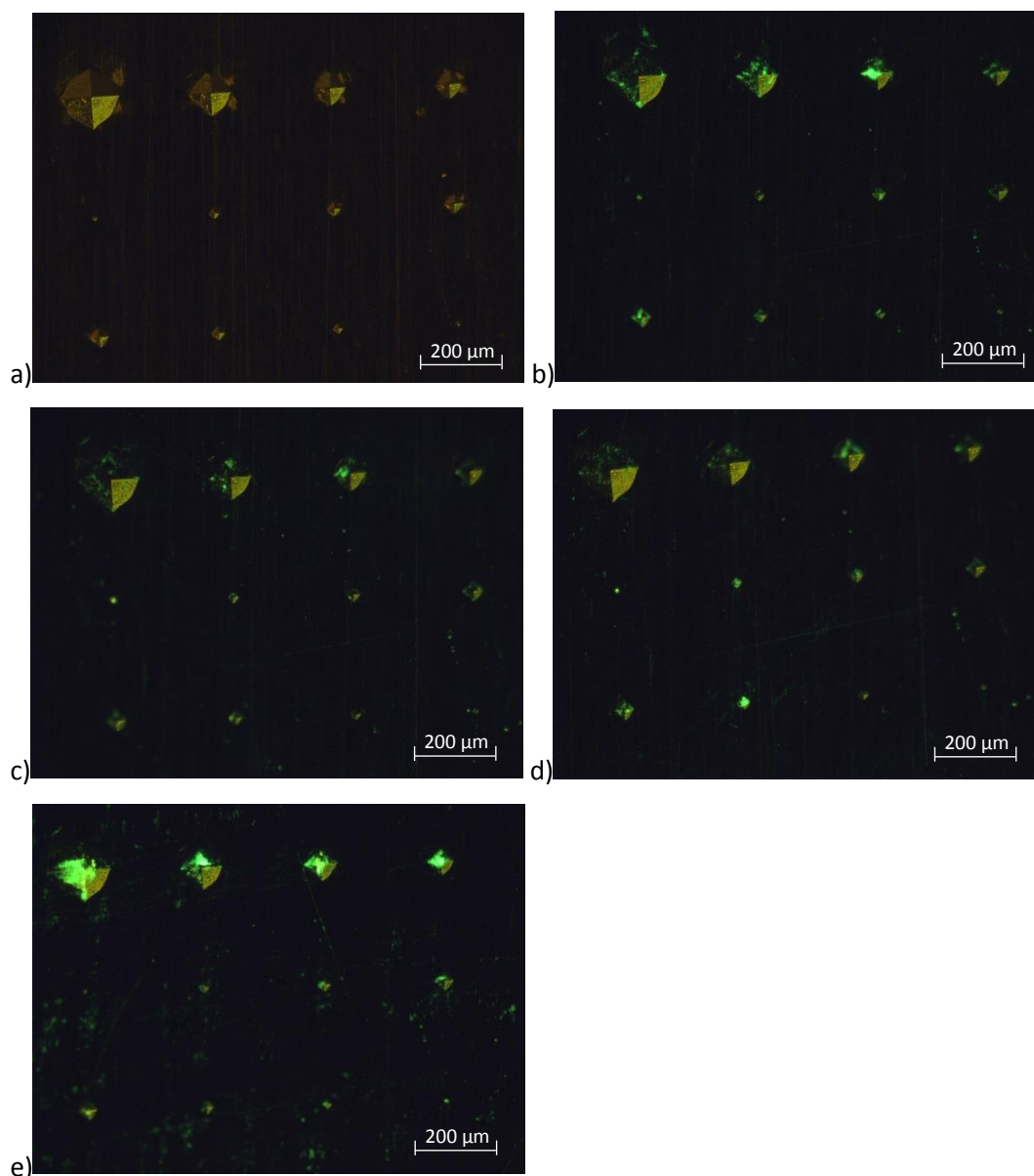


Figura 5.7 – Ensaio AA 1100.

a) sem CB; b) exclusivamente com deposição de CB; c) PF_Btriaxial;
d) PF_Btriaxial_permanente; e) PF_eléctrico.

Nas imagens da Figura 5.7 é possível observar que as CB ocuparam todos os defeitos, inclusive no ensaio em que se procedeu à deposição da suspensão de CB sobre a superfície do provete sem a aplicação de qualquer campo, eléctrico ou magnético. Deste modo, dada a afinidade das CB com o AA 1100, não é possível retirar conclusões quanto ao efeito da aplicação de campos eléctricos ou magnéticos, uma vez que mesmo sem a sua aplicação as CB penetraram em todos os defeitos padrão.

Neste caso, apesar de não ser possível concluir qual o protótipo funcional que conduz a melhores resultados, fica evidente a capacidade da técnica de END em detectar defeitos padrão no AA 1100. Os ensaios experimentais foram repetidos utilizando a mesma metodologia, tendo-se verificado a repetibilidade dos resultados obtidos no primeiro ensaio com deposição das CB (sem campos aplicados), conforme ilustrado na Figura 5.8.

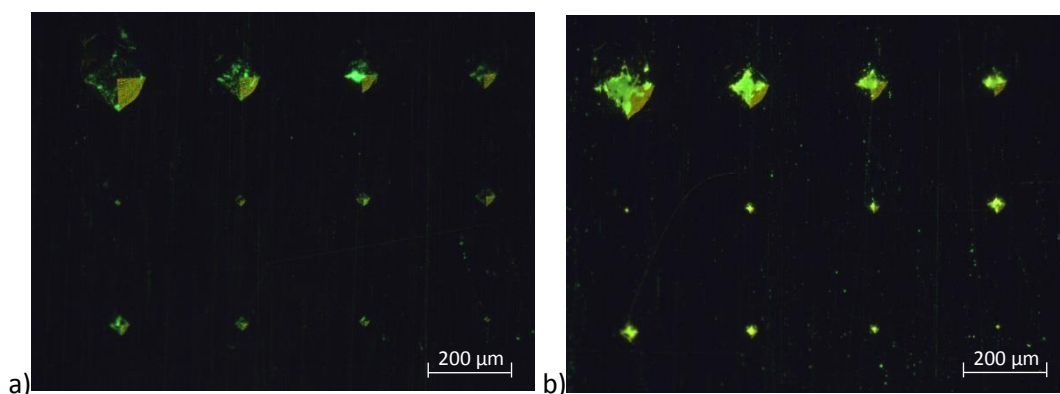


Figura 5.8 – Repetibilidade dos resultados (ambos exclusivamente com deposição de CB).
a) imagem do primeiro ensaio; b) imagem do último ensaio.

5.5.2 – AISI 316L

Com a finalidade de validar o novo protótipo funcional desenvolvido para a aplicação de campo magnético permanente triaxial, foram realizados novos ensaios no AISI 316L. Com a realização de ensaios num material e geometria de defeitos já conhecidos pretendeu-se comparar os resultados utilizando o novo protótipo funcional, com os resultados obtidos em trabalhos anteriores [6]. Foi utilizada a bactéria *Rhodococcus erythropolis* com potencial negativo, sendo os resultados dos ensaios apresentados na Figura 5.9.

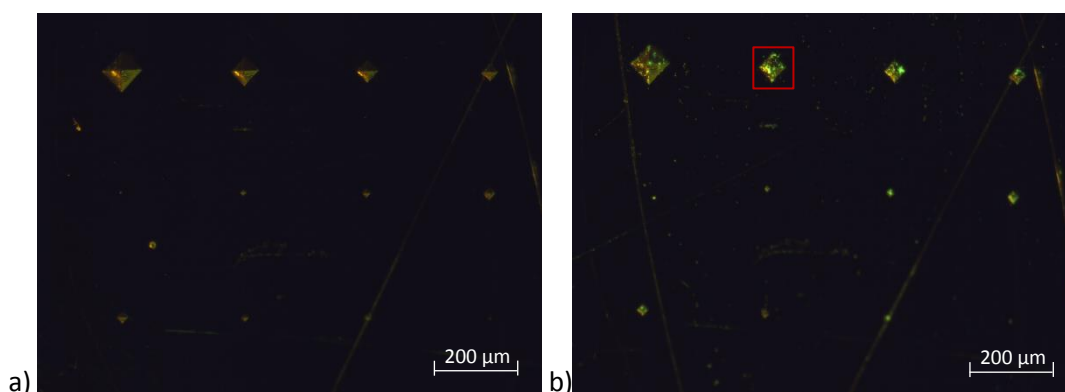


Figura 5.9 – Ensaio AISI 316L.

a) deposição de CB sem aplicação de campos; b) PF_Btriaxial_permanente.

No ensaio realizado apenas com deposição da suspensão sobre a superfície do provete não ocorreu a adesão das células aos defeitos. No ensaio com aplicação de campo magnético verificou-se a adesão de células até ao defeito F, conforme é possível observar na Figura 5.9b. Neste ensaio verificou-se ainda a adesão das CB às irregularidades superficiais do provete. Pelo facto de a quantidade de suspensão de CB depositada sobre o provete ser reduzida comparativamente à utilizada em ensaios anteriores realizados em trabalhos anteriores [6], foi possível observar, pela primeira vez, que as CB ocupam preferencialmente as irregularidades existentes na superfície dos defeitos padrão. Tal significa que, dentro de um dado defeito, as CB ocupam preferencialmente as irregularidades existentes no seu interior, conforme ilustrado pela Figura 5.10, correspondente à ampliação da zona assinalada na Figura 5.9b. Este fenómeno sugere que as CB apresentam potencial para a detecção de defeitos de menor dimensão, pelo que é possível os defeitos padrão se encontrarem sobredimensionados face ao real limiar de detectabilidade da técnica de END com CB.

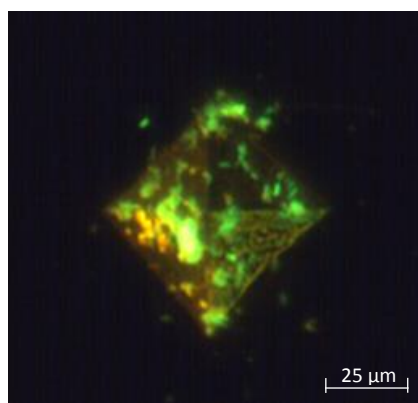


Figura 5.10 – Pormenor da localização das CB no interior de um defeito padrão.

Com a finalidade de esclarecer esta questão foi ensaiado um provete do mesmo material (AISI 316L) com nano indentações. Por forma a ser possível a comparação deste ensaio com o realizado para o provete com micro indentações, foi utilizada novamente a bactéria *Rhodococcus erythropolis* com potencial negativo. Foram ainda utilizados diferentes equipamentos dedicados, sendo os resultados apresentados na Figura 5.11.

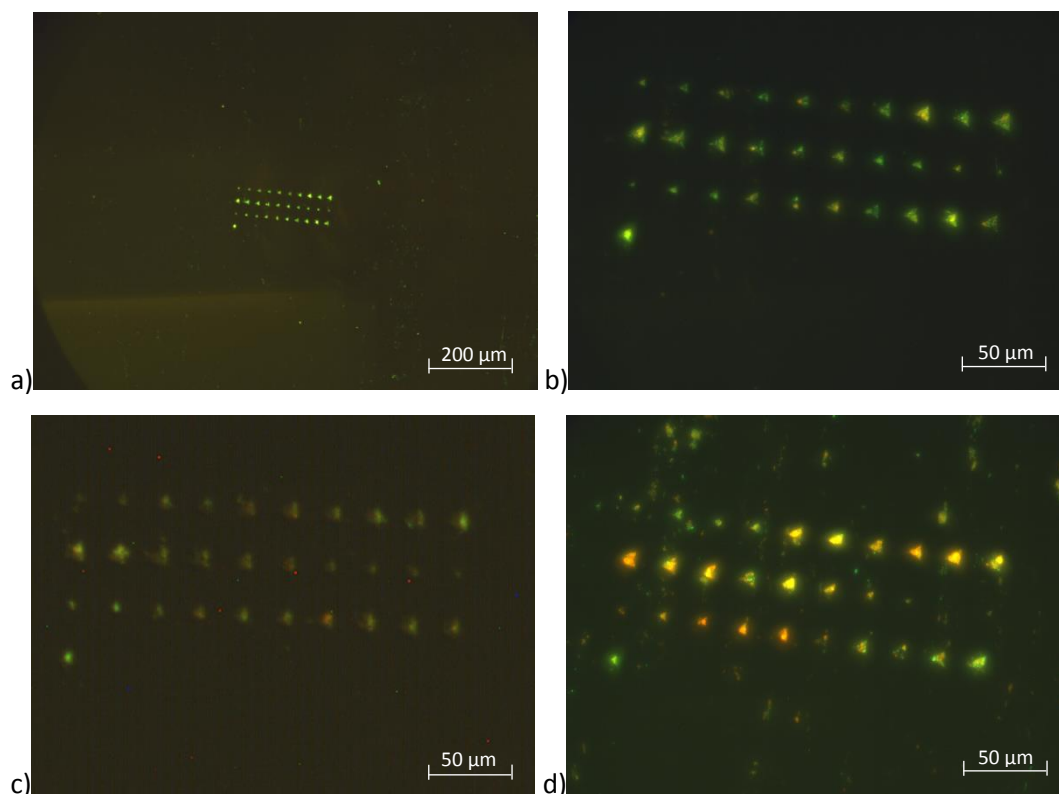


Figura 5.11 – Ensaio AISI 316L com nano indentações.

a) deposição de CB sem aplicação de campos (ampliação 150x); b) deposição de CB sem aplicação de campos (ampliação 600x); c) Pêndulo 3D; d) PF_eléctrico.

No ensaio apenas com deposição de CB (sem aplicação de campo eléctrico ou magnético), as CB penetraram em todos os defeitos existentes, estabelecendo um novo valor para o limiar de detectabilidade da técnica no AISI 316L ($L/P = 5,3/0,4 \mu\text{m}$). Após ter sido efectuada a limpeza da superfície do provete e ter sido observado ao microscópio óptico que já não existiam CB na superfície, foi repetido o ensaio experimental. Os resultados deste segundo ensaio corroboraram os resultados iniciais, verificando-se mais uma vez a repetibilidade da técnica.

Para a aplicação de campo magnético permanente foi utilizado o modo Pêndulo 3D do PF_Btriaxial_permanente. Com a aplicação de campo magnético era esperado que os defeitos fossem ocupados por um maior número de células, o que não se verificou, apesar de as células terem penetrado em todos os defeitos da matriz. O ensaio realizado com a aplicação de campo

eléctrico permitiu também identificar os nano defeitos. As CB apenas não penetraram nos defeitos B1, C1 e D1 da linha central da matriz, o que pode dever-se a uma distribuição não uniforme das células na superfície dado que foram detectados defeitos idênticos (igual dimensão) nas restantes linhas da matriz.

Os resultados deste ensaio corroboram a suposição inicial de as micro indentações utilizadas não serem apropriadas para estabelecer o limiar de detectabilidade da técnica, dado as suas dimensões serem consideravelmente superiores às das nano indentações identificadas neste ensaio. Deste modo fica evidente o potencial da técnica para a detecção de defeitos de dimensões mais reduzidas que as das micro indentações.

5.5.3 – Titânio (*grade 5*)

No caso do titânio (*grade 5*) já havia sido testado no trabalho de Patrick Inácio [6], para as matrizes de micro indentações, tendo sido detectados os defeitos padrão do provete ensaiado, à excepção do defeito de menor dimensão (H). Neste trabalho foi testada uma nova morfologia de defeito para este material, nomeadamente os defeitos do tipo risco. Os ensaios foram realizados com deposição da suspensão da bactéria *Rhodococcus erythropolis* com potencial negativo, sendo os resultados dos ensaios apresentados na Figura 5.12.

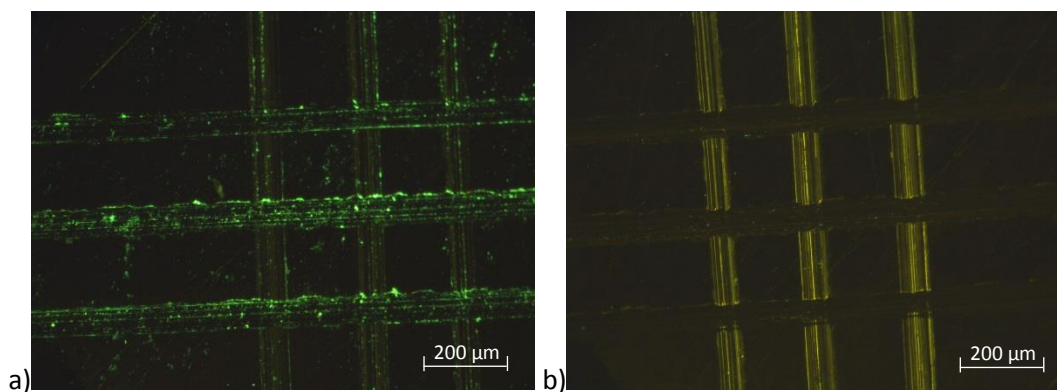


Figura 5.12 – Ensaio Ti.

a) deposição de CB sem aplicação de campos; b) PF_Btriaxial_permanente.

No ensaio em que se procedeu à deposição das células sem a aplicação de campos, verificou-se que estas aderiram preferencialmente aos defeitos alinhados horizontalmente, enquanto os defeitos na vertical não possuem CB. Neste ensaio a limpeza do excesso da suspensão de CB foi efectuada na direcção vertical, o que pode ter condicionado o resultado final do ensaio, dado que nos defeitos orientados segundo esta direcção não existiam CB. Quanto ao ensaio com o PF_Btriaxial_permanente, verificou-se que a suspensão de CB não

aderiu à superfície do material, tendo sido removidas na etapa de limpeza da superfície. Os resultados obtidos sugerem que, pelo facto de a dimensão dos defeitos presentes no provete ser superior à dos defeitos padrão produzidos com o microdurómetro, a forma como é efectuada a limpeza da superfície desempenha um papel preponderante para a detecção dos defeitos, ou seja, trata-se de uma etapa crítica do procedimento de ensaio. O ensaio com aplicação de campo eléctrico foi inconclusivo, sendo que as CB se encontravam dispersas pela superfície sem terem aderido preferencialmente aos defeitos do tipo risco, conforme ilustra a Figura 5.13.

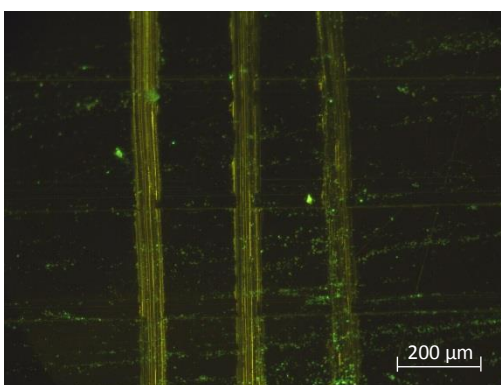


Figura 5.13 – Ensaio Ti com aplicação de campo eléctrico.

Foi também inspeccionado um outro provete de titânio (com cerca de 1 mm de espessura), neste caso tratou-se de um conjunto de três pontos de soldadura, com cerca de 700 µm de diâmetro, desconhecendo-se à partida a existência de defeitos superficiais. Deste modo pretendia-se detectar, caso existissem, fissuras resultantes do processo de soldadura, sendo que o provete não possuía defeitos padrão. Os ensaios foram realizados apenas com a deposição das CB (*Rhodococcus erythropolis* com potencial positivo) sobre o provete, sem a aplicação de campos eléctricos ou magnéticos. Os resultados dos ensaios são apresentados na Figura 5.14.

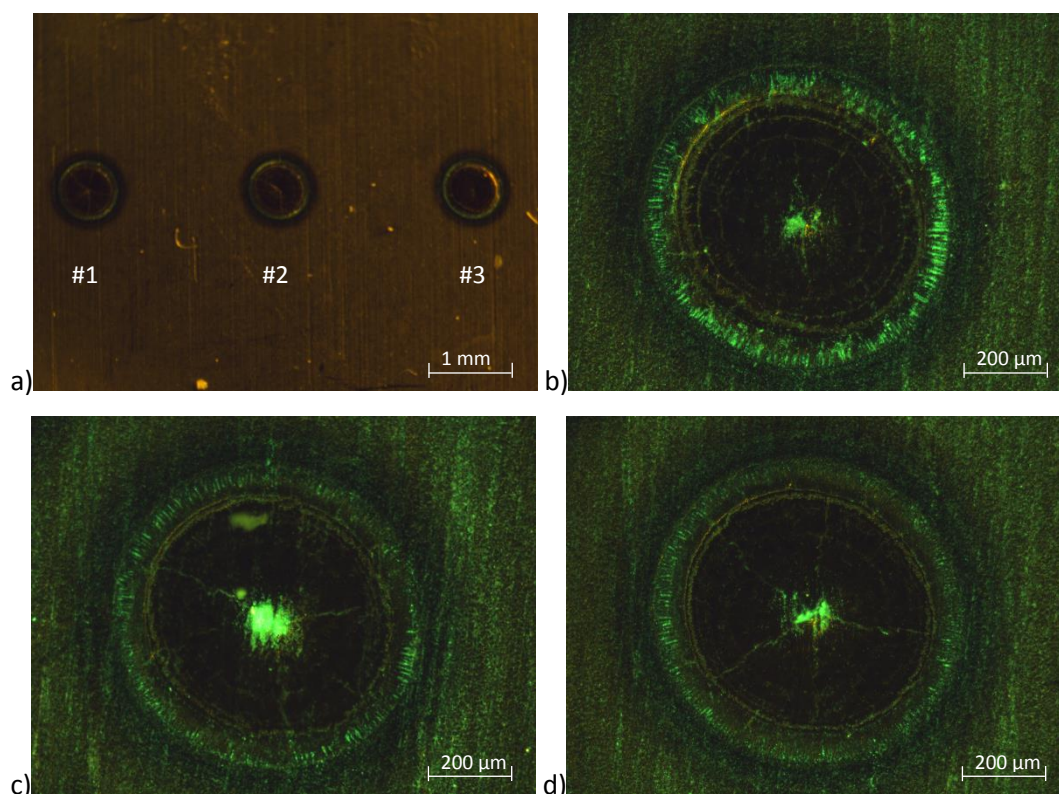


Figura 5.14 – Ensaio soldadura em Ti.

a) conjunto dos três pontos de soldadura; b) soldadura #1; c) soldadura #2; d) soldadura #3.

As CB permitiram identificar a existência de fissuras radiais nas soldaduras, bem como a rugosidade superficial da região que as delimitava. Tal como na soldadura em NiTi, também neste ensaio a técnica de END com CB possibilitou a identificação de defeitos reais inicialmente desconhecidos e, portanto, não caracterizados. Deste modo, foi verificada a validade da técnica para a detecção de defeitos para uma morfologia que não a dos defeitos padrão, tendo sido deste modo validada a técnica para uma morfologia distinta.

5.5.4 – Níquel-titânio

O níquel-titânio (NiTi) já havia sido igualmente testado no trabalho de Patrick Inácio [6], para as matrizes de micro indentações, não tendo contudo sido detectados os defeitos padrão existentes no provete. Com este ensaio pretendia-se assim aferir a capacidade das células para a detecção de defeitos com a nova morfologia e comparar os resultados com os ensaios realizados com matrizes de indentações. Os ensaios foram realizados com deposição da suspensão de CB, tendo sido adicionalmente utilizado o PF_Btriaxial_permanente. Foi utilizada a bactéria *Rhodococcus erythropolis* com potencial negativo, sendo os resultados dos ensaios apresentados na Figura 5.15.

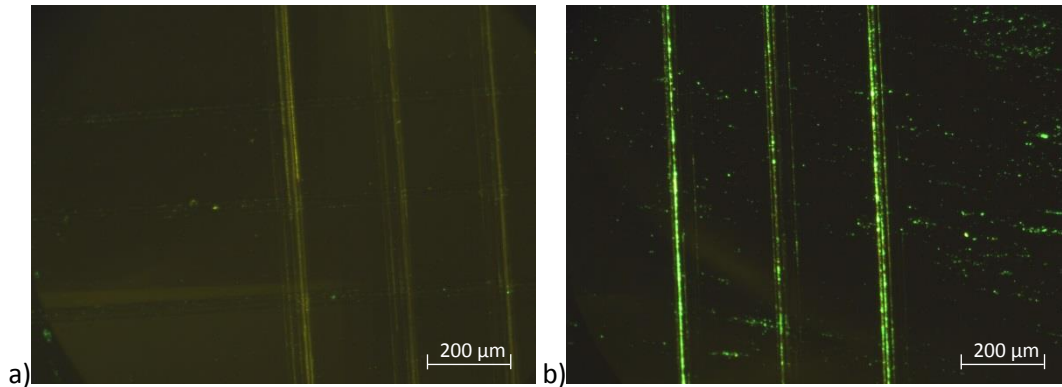


Figura 5.15 – Ensaio NiTi.

a) deposição de CB sem aplicação de campos; b) PF_Btriaxial_permanente.

No ensaio em que se procedeu à deposição das células sem a aplicação de campos, a suspensão de CB não aderiu à superfície, tendo sido removida na etapa de limpeza da superfície. Quanto ao ensaio com o PF_Btriaxial_permanente, verificou-se que a suspensão de CB aderiu preferencialmente aos defeitos mas também se encontrava dispersa pela superfície do provete. Neste caso foi visível a diferença resultante da aplicação do campo magnético, com as CB a permitirem a identificação clara dos defeitos alinhados segundo a direcção normal à direcção de limpeza da superfície. Este ensaio foi repetido, tendo sido verificado novamente que as CB permaneciam preferencialmente nos defeitos alinhados segundo a direcção normal à direcção de limpeza, pelo que neste caso a forma como a limpeza é realizada influencia os resultados da técnica. A explicação para este fenómeno pode residir no facto de se tratarem de defeitos de maior dimensão comparativamente aos defeitos produzidos por micro indentação, em que a pressão empregue para efectuar a limpeza pode ter removido as CB que eventualmente tivessem penetrado nos defeitos. Deste modo, a limpeza deve ser efectuada de forma não intrusiva, como por exemplo através do recurso a luz ultravioleta com comprimento de onda bactericida.

Foi ainda testado um provete de NiTi com um cordão de soldadura laser relativamente ao qual se desconhecia a existência de defeitos, não sendo possível identificar qualquer defeito a olho nu. Por oposição aos provetes padrão, neste caso os defeitos não se encontravam caracterizados, desconhecendo-se portanto a sua localização, morfologia e dimensões. Os resultados dos ensaios são apresentados na Figura 5.16.

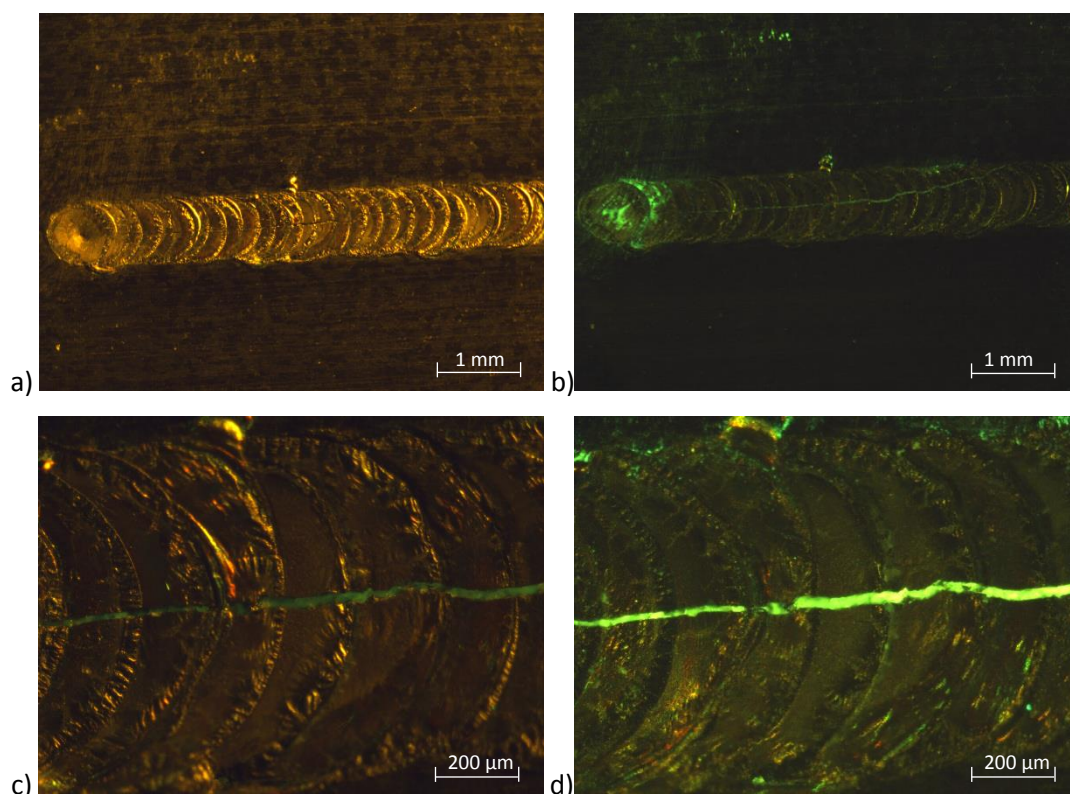


Figura 5.16 – Ensaio soldadura laser em NiTi. a) sem luz; b) com luz fluorescente; c) pormenor da soldadura (sem luz fluorescente); d) pormenor da soldadura (com luz fluorescente).

Os ensaios foram realizados com deposição da suspensão de CB, tendo neste ensaio sido utilizada a bactéria *Rhodococcus erythropolis* com potencial positivo. Neste ensaio não foram aplicados campos eléctricos ou magnéticos sobre as CB, tendo contudo sido possível identificar uma fissura longitudinal do cordão de soldadura, cuja existência se desconhecia antes do ensaio com CB. Importa salientar o facto de a rugosidade superficial da soldadura não ter sido confundida com a fissura existente, a qual foi identificada de forma inequívoca e em toda a extensão.

5.5.5 – Carboneto de tungsténio

O carboneto de tungsténio (WC) é um material amplamente utilizado nas ferramentas de corte, com interesse ao nível das aplicações industriais, razão pela qual foi incluído no conjunto de materiais testados. Para os ensaios realizados foi utilizado um provete, mais concretamente uma pastilha de WC de uma ferramenta de corte na qual foi produzida uma única matriz de micro indentações. Por se tratar de um material duro (da ordem de 1700 HV [24]), os menores defeitos da matriz de indentações são de difícil identificação ao microscópio, impedindo a determinação das suas dimensões. Assim, a matriz de indentações

produzida no provete de WC apenas possuía os defeitos padrão A, B, C e D (dispostos alternadamente entre si). No caso do segundo provete pretendeu-se identificar eventuais defeitos resultantes do desgaste da ferramenta, desconhecidos à partida. Os ensaios foram realizados com deposição da suspensão de CB, tendo sido adicionalmente utilizado o PF_Btriaxial_permanente. Os resultados do ensaio do provete contendo a matriz de indentações são apresentados na Figura 5.17, sendo todas as imagens referentes à zona da matriz de defeitos.

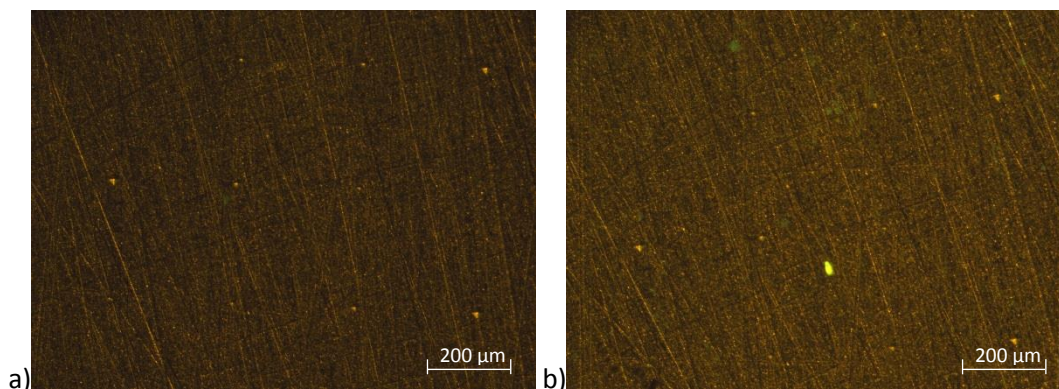


Figura 5.17 – Ensaio WC.

a) deposição de CB sem aplicação de campos; b) PF_Btriaxial_permanente.

Pelo facto de a ferramenta de corte possuir cobalto na sua composição química, que apresenta propriedades antibacterianas, a suspensão de CB não aderiu à sua superfície, impedindo que as CB penetrassem nos defeitos padrão e assinalassem a sua presença. Verificou-se que a aplicação de campos magnéticos também não conduziu à obtenção de melhores resultados. Trata-se portanto de um fenómeno intrínseco ao binómio CB/material, pelo que nem mesmo as variantes utilizadas para promover a penetração das CB (aplicação de campo magnético ou eléctrico) conseguem contrariar este efeito.

5.5.6 – AISI 316L Brasado

Os ensaios foram realizados com deposição da suspensão de CB, tendo sido adicionalmente utilizado o PF_Btriaxial. Os resultados do ensaio são apresentados na Figura 5.18.

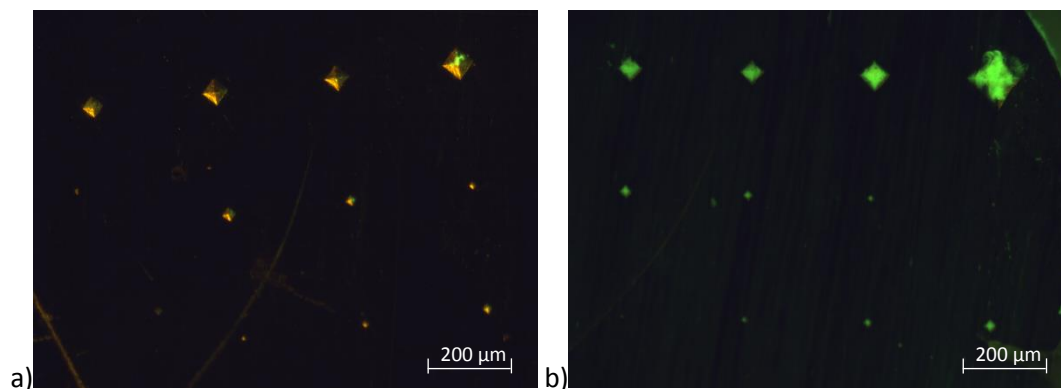


Figura 5.18 – Ensaio AISI 316L Brasado.
a) deposição de CB sem aplicação de campos; b) PF_Btriaxial.

Também no ensaio do AISI 316L Brasado verificou-se que a aplicação de campo magnético sobre o provete potencia a penetração das CB nos defeitos, permitindo a identificação dos mesmos. No ensaio realizado apenas com deposição da suspensão de CB, estas permitiram somente identificar os defeitos do tipo B, enquanto no ensaio realizado com aplicação de campo magnético, as células preencheram praticamente na totalidade o interior dos defeitos, permitindo a identificação inequívoca de todos os tipos de defeitos à exceção do defeito do tipo H.

5.5.7 – Ouro

Incluído no conjunto de materiais ensaiados pela primeira vez com a técnica de END com CB, o ouro trata-se de um material bastante interessante por ser inerte. O provete de ouro ensaiado não possuía defeitos artificialmente produzidos, apresentando antes um conjunto de caracteres, obtidos por cunhagem (Figura 5.19), e uma marca obtida por maquinagem (Figura 5.20).

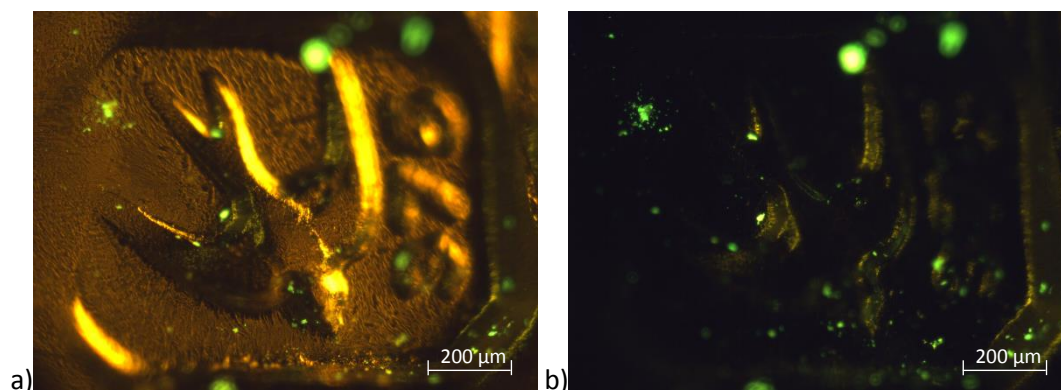


Figura 5.19 – Ensaio ouro. a) com luz; b) sem luz.

Os ensaios foram realizados com deposição da suspensão de CB (*Rhodococcus erythropolis* com potencial positivo), não tendo sido aplicados campos eléctricos ou magnéticos sobre o provete utilizado, uma vez que as suas dimensões não o permitiram.

No caso do símbolo cunhado na superfície verificou-se que as CB não se encontravam dispostas preferencialmente em torno do símbolo cunhado. As CB permaneceram em reduzida quantidade na superfície do provete, encontrando-se dispersas pela superfície e sem identificarem qualquer irregularidade, conforme é visível na Figura 5.19.

Na Figura 5.20 é possível observar o preenchimento do relevo dos caracteres da superfície pela suspensão de CB, possibilitando a identificação da morfologia interior dos caracteres. Apesar de a área examinada ser relativamente extensa quando comparada com a generalidade dos restantes provetes ensaiados e de a morfologia da peça ser acidentada, a suspensão de CB preencheu a totalidade da superfície do provete. A Figura 5.20b e a Figura 5.20c correspondem a ampliações das zonas assinaladas nas Figura 5.20a e Figura 5.20b, respectivamente.

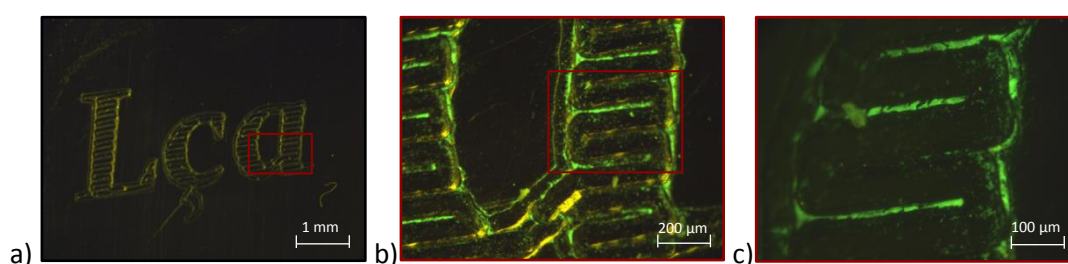


Figura 5.20 – Ensaio ouro. a) letras gravadas na superfície; b) pormenor (ampliação 150x) c) pormenor (ampliação 300x).

Verificou-se deste modo que a técnica conduz a resultados distintos dependendo da topografia superficial do provete. Anteriormente à realização deste ensaio era desconhecido o facto de que, para o mesmo material, as CB apresentam maior afinidade com determinada topografia superficial. Neste caso, a condição superficial (mais polida e lisa na zona cunhada do provete e mais irregular na zona fresada) parece desempenhar um papel decisivo na adesão das CB, a qual pode agora ser vista como um novo factor a ter em consideração para a detecção de defeitos com a técnica de END com CB. Este resultado sugere que, para além da composição química do material, o acabamento superficial também pode condicionar de forma importante os resultados da técnica de END com CB.

5.5.8 – Lentes oftálmicas

As lentes oftálmicas foram testadas pela primeira vez com a técnica de END com CB neste trabalho, desconhecendo-se portanto, à partida, qual seria o comportamento das CB. O provete utilizado apresentava uma linha da matriz de defeitos padrão (defeitos padrão A a D) e um conjunto de três riscos dispostos paralelamente entre si, conforme ilustrado na Figura 5.21.

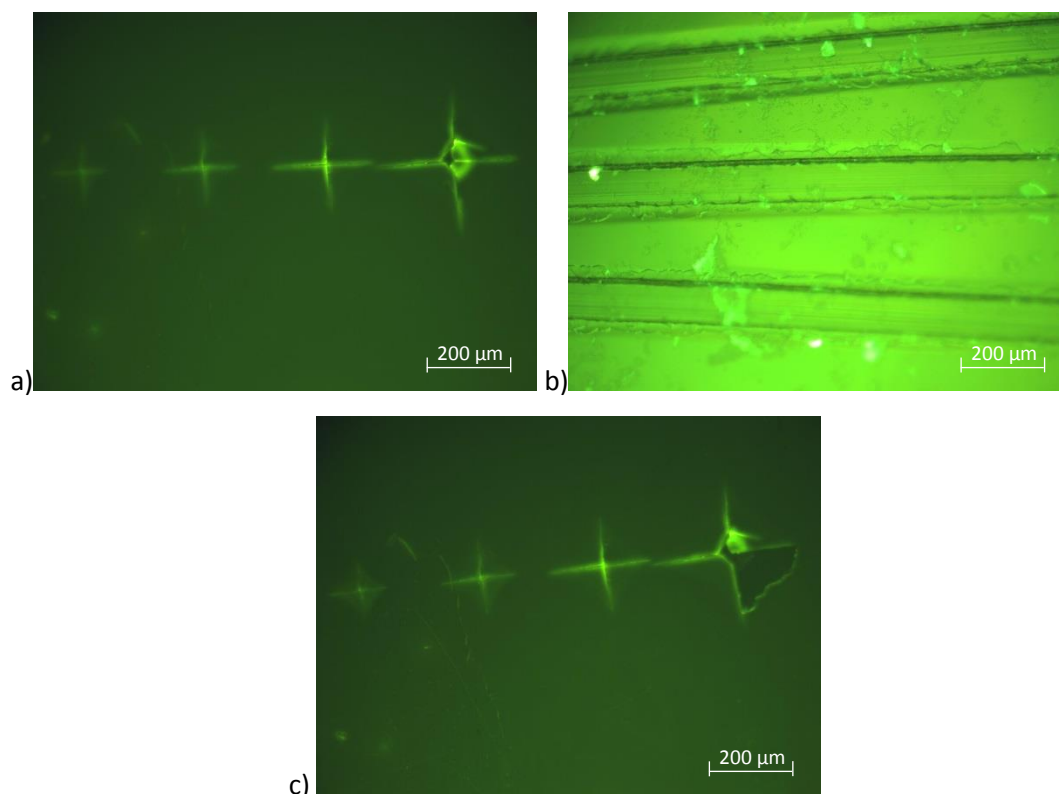


Figura 5.21 – Ensaio lentes oftalmológicas. a) exclusivamente com deposição de CB; b) exclusivamente com deposição de CB; c) PF_Btriaxial.

Os ensaios foram realizados com deposição da suspensão de CB, tendo sido adicionalmente utilizado o PF_Btriaxial. Foi utilizada a bactéria *Rhodococcus erythropolis* com potencial negativo. Verificou-se que a suspensão de CB não aderiu à superfície do material, tendo sido removidas na etapa de limpeza da superfície, antes da observação ao microscópio óptico. A aplicação de campo magnético utilizando o PF_Btriaxial também não conduziu a resultados satisfatórios, devido à incompatibilidade das CB com a superfície das lentes utilizadas. Esta incompatibilidade deve-se ao revestimento hidrofóbico das lentes [12], o qual têm a função de dificultar a adesão de água à superfície destas, e que portanto também não permite que a suspensão de CB (meio aquoso) adira à superfície.

5.5.9 – Padrões de sensibilidade da técnica de END por LP

Como apresentado no § 2.4, os padrões de sensibilidade (tipo 1) são utilizados com a finalidade de garantir que os produtos, tanto o penetrante como o revelador, se encontram em condições adequadas e que o procedimento de inspecção é aplicado correctamente. Com a utilização destes padrões nos ensaios com CB pretendeu-se avaliar a capacidade das CB penetrarem numa morfologia de defeito diferente da das micro indentações, e por outro lado a utilização de padrões normalizados constitui um método de controlo das CB, ou seja, permite apurar qual a *sensibilidade* das CB utilizadas em diferentes ensaios, assegurando assim a comparabilidade dos resultados obtidos com a técnica de END por LP. As dimensões dos padrões de sensibilidade excedem as dimensões dos suportes dos provetes de todos os protótipos funcionais utilizados para a aplicação de campos eléctricos ou magnéticos, pelo que os ensaios foram realizados apenas com a deposição das CB (*Rhodococcus erythropolis* com potencial positivo e negativo) sobre a superfície, sendo que os resultados dos ensaios do padrão de sensibilidade tipo 1 se encontram na Figura 5.22.

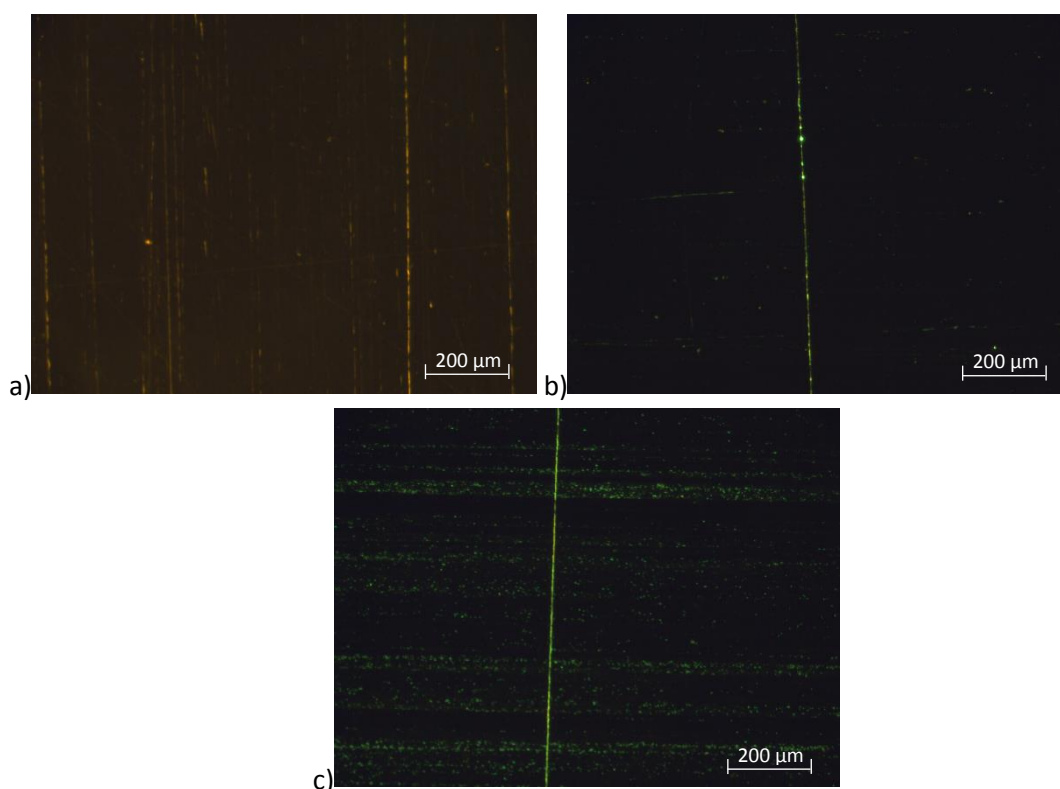


Figura 5.22 – Ensaio padrão de sensibilidade 1. a) sem CB; b) *Rhodococcus erythropolis* com potencial negativo; c) *Rhodococcus erythropolis* com potencial positivo.

Na Figura 5.22b é possível observar que no ensaio com as CB com potencial negativo foi detectada uma fissura do padrão, através do alinhamento das CB no seu interior. No ensaio

com as CB com potencial positivo apesar de ter sido detectada a fissura, existiam CB dispersas na superfície do padrão de sensibilidade. Foi igualmente possível detectar diversas fissuras, sendo que as CB aderiram também ao relevo da letra identificativa do padrão (A). Na Figura 5.23 é apresentada uma das fissuras identificadas no ensaio e o relevo da letra.

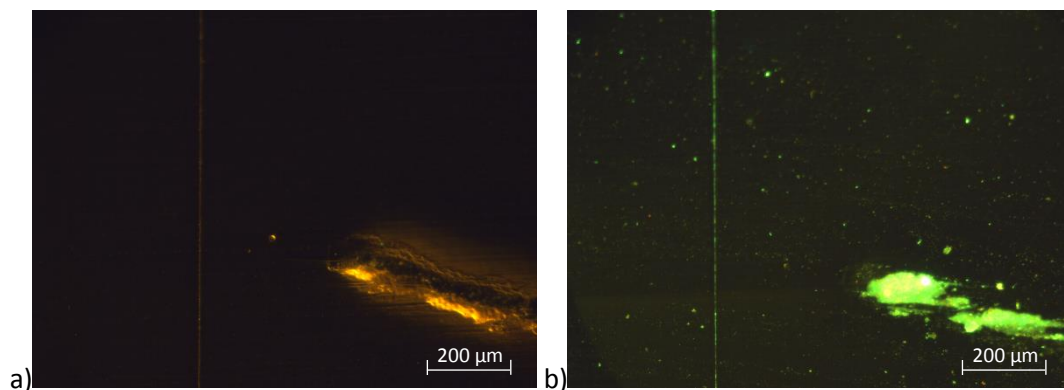


Figura 5.23 – Ensaio padrão de sensibilidade tipo 1.
a) sem CB; b) *Rhodococcus erythropolis* com potencial positivo.

5.6 – Ensaios experimentais com líquidos penetrantes

A utilização da técnica de END por líquidos penetrantes (LP) para a detecção de micro defeitos superficiais, nomeadamente para a detecção dos defeitos padrão anteriormente apresentados (§ 5.2), foi explorada em desenvolvimentos anteriores da técnica de END com CB [5]. Os ensaios experimentais então realizados seguiram o procedimento experimental do método de inspeção por LP, tendo sido verificada a incapacidade da técnica em detectar os referidos defeitos padrão. Contudo as condições de realização desses ensaios não foram comparáveis às condições de ensaio da técnica de END com CB, desde logo pelo facto de os provetes não serem observados ao microscópio óptico após a aplicação dos LP. Este facto constitui portanto uma diferença significativa entre os dois métodos, dado se tratar da detecção de micro defeitos superficiais.

Com efeito, foram realizados novos ensaios com LP, agora de acordo com a metodologia de aplicação da técnica de END com CB. Foram ensaiados provetes com micro indentações em diferentes materiais, sendo que a planificação dos ensaios experimentais realizados se encontra na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Planificação dos ensaios experimentais com LP.

Material	Tipo de defeito
AA 1100	Micro indentações
AISI 316L	Micro indentações
Titânio (<i>grade 5</i>)	Micro indentações
	Soldadura laser
Níquel-titânio	Soldadura laser
Cobre	Micro indentações
ABS	Micro indentações
Padrões de sensibilidade (tipo 1)	Fissura

Existem diversos tipos de LP, sendo que a escolha do penetrante a utilizar se encontra dependente do tipo e dimensão das descontinuidades, da qualidade superficial da peça a inspeccionar e ainda de factores económicos, conforme discutido no § 2.4. Para os ensaios experimentais foram utilizados LP fluorescentes, pelo facto de estes possuírem uma maior sensibilidade. Na Figura 5.24 são apresentados os LP do fabricante MR Chemie, utilizados nos ensaios.



Figura 5.24 – LP utilizados nos ensaios experimentais [18].

5.6.1 – AA 1100

O END com LP no AA 1100 permitiu detectar todos os defeitos padrão da matriz de defeitos. Contudo, tal só foi possível antes da fase de revelação e através da observação ao microscópio óptico, uma vez que aquando da aplicação do revelador foi criado um filme contínuo translúcido que impediu a observação da superfície provete e consequentemente a identificação dos defeitos. Deste modo, o revelador não desempenhou a sua função de devolver à superfície o líquido penetrante que se encontrava no interior dos defeitos padrão, pelo que seguindo a metodologia de aplicação do END com LP não foi possível detectar nenhum defeito superficial. Tal deveu-se ao facto de a quantidade de penetrante presente nos defeitos ser tão diminuta que tornou impossível a identificação destes com a aplicação de revelador. Neste tipo de defeitos não existe um "reservatório" de LP como acontece com as fissuras do padrão tipo 1 (com 20 μm de profundidade), o que limita consideravelmente a eficácia da técnica de END por LP. Os resultados do ensaio experimental são apresentados na Figura 5.25. Neste ensaio foi também notória a tendência para a existência de falsos positivos (Figura 5.25b), o que não se verificou nos ensaios com as CB.

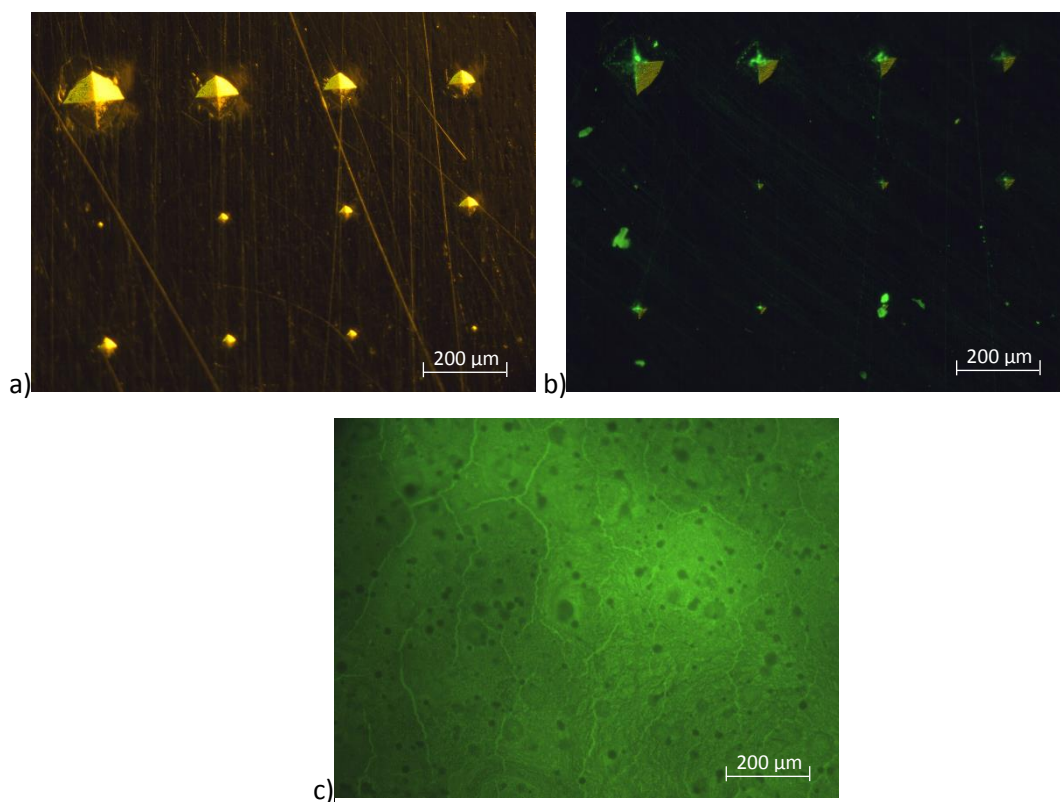


Figura 5.25 – Ensaio AA 1100.

a) sem aplicação de LP; b) com LP (sem revelador); c) com LP após aplicação de revelador.

5.6.2 – AISI 316L

Para o AISI 316L verificou-se que o ensaio com LP permitiu a identificação de todos os defeitos da matriz à excepção do defeito mais pequeno (defeito H). Tal como para o AA 1100, a detecção dos defeitos só foi possível antes da fase de revelação e através da observação ao microscópio óptico, devido novamente à formação de um filme contínuo do produto revelador sobre a superfície do provete. Os resultados do ensaio experimental são apresentados na Figura 5.26.

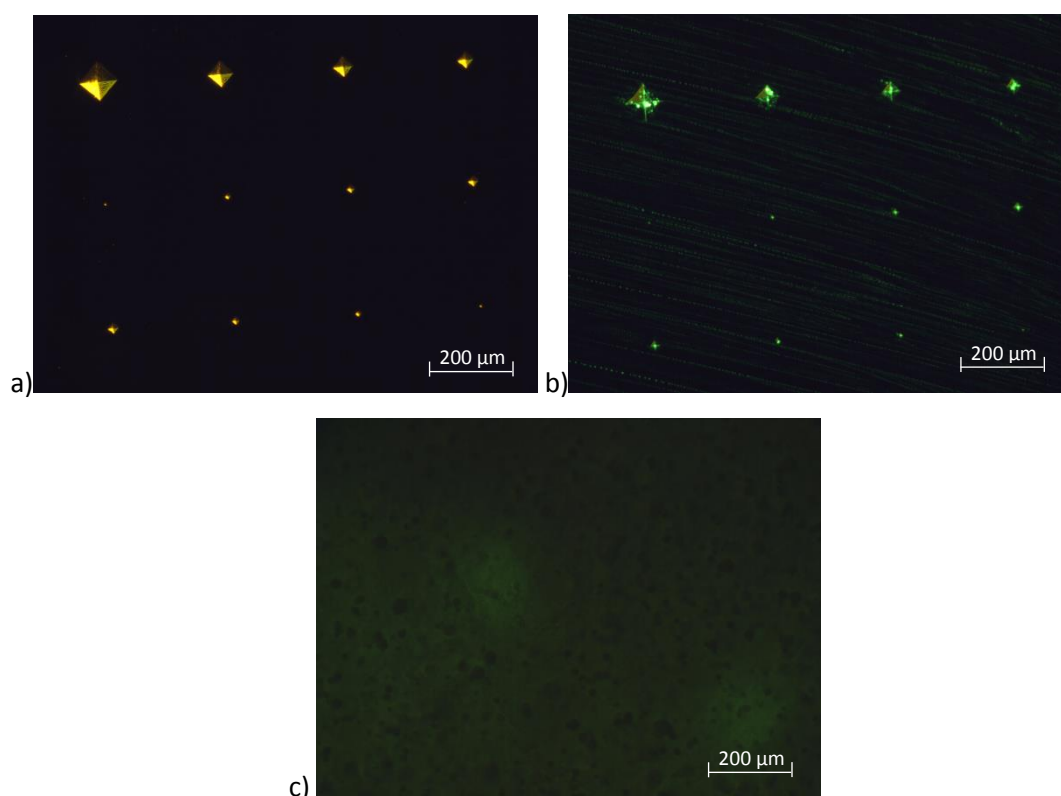


Figura 5.26 – Ensaio AISI 316L: a) sem aplicação de LP; b) com LP (sem revelador); c) com LP após aplicação de revelador.

5.6.3 – Titânio (*grade 5*)

No caso do titânio foram detectados todos os defeitos à excepção do defeito H, após a aplicação dos LP sobre o provete e através da observação ao microscópio óptico. Uma vez mais a aplicação do revelador originou um filme contínuo sobre a superfície do provete, impedindo assim a identificação dos defeitos padrão e não conduzindo à superfície o LP que se encontrava nos defeitos. Os resultados do ensaio experimental são apresentados na Figura 5.27.

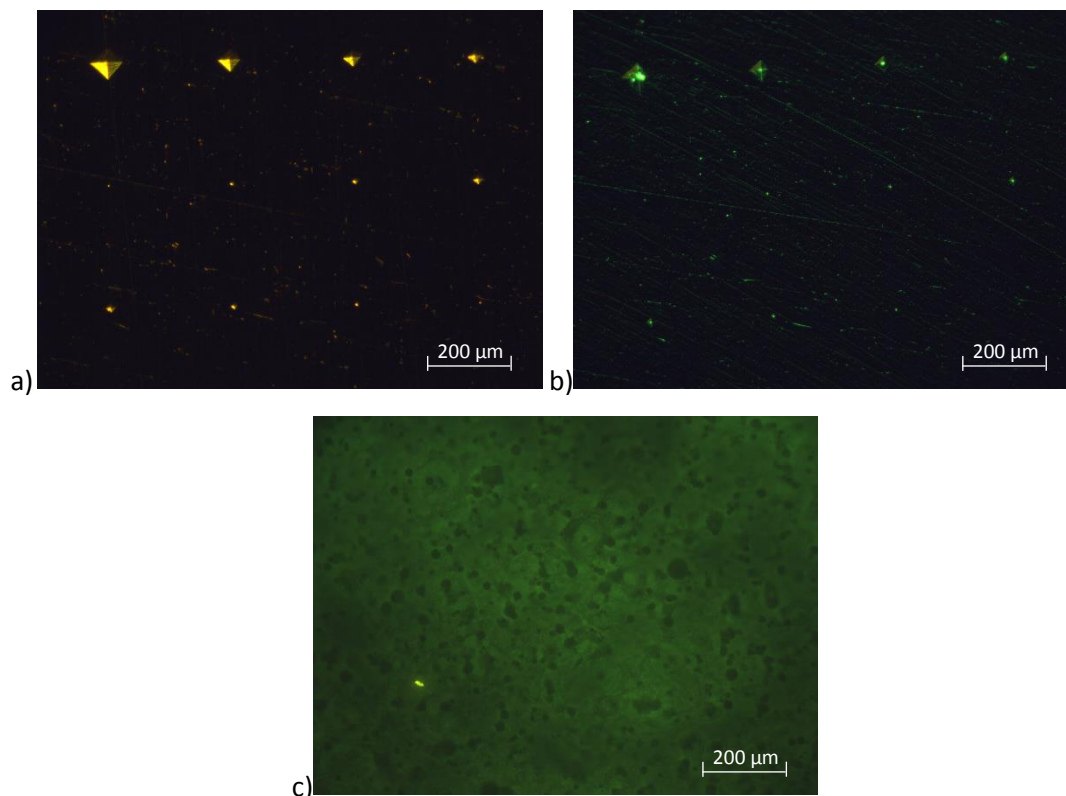


Figura 5.27 – Ensaio Ti.

a) sem aplicação de LP; b) com LP (sem revelador); c) com LP após aplicação de revelador.

5.6.4 – Níquel-titânio

Para a soldadura laser em níquel-titânio, a aplicação de LP (sem a etapa de revelação) possibilitou a identificação clara da fissura existente no cordão de soldadura, conforme a Figura 5.28b ilustra. Este resultado é semelhante ao obtido com a técnica de END com CB, no qual foi também identificada de forma evidente a fissura existente no cordão de soldadura. No entanto, a presença de uma quantidade elevada de LP na rugosidade do cordão teria provavelmente impedido que a distinção da fissura existente após a aplicação do revelador.

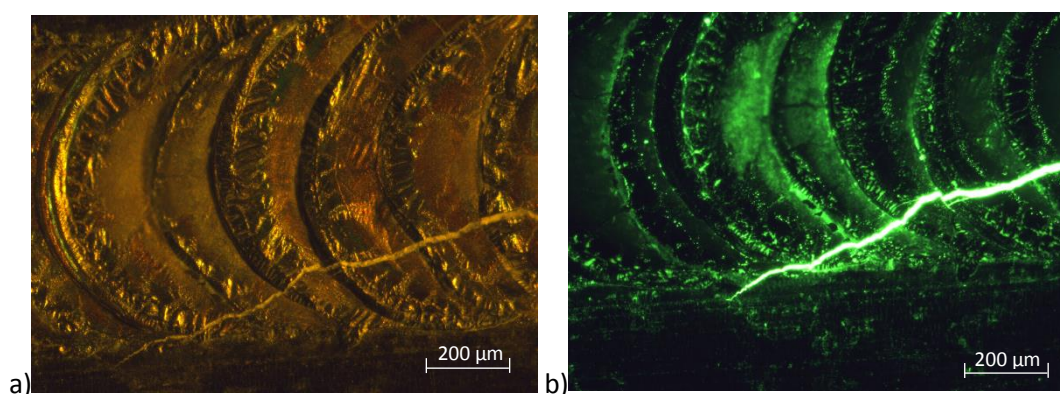


Figura 5.28 – Ensaio NiTi. a) sem aplicação de LP; b) com LP (sem revelador).

5.6.5 – Cobre

Para o cobre não foram detectados os defeitos G e H, conforme é possível observar na Figura 5.29. Apesar de os LP terem aderido aos restantes defeitos importa referir que a quantidade de LP existente nos defeitos era reduzida comparativamente à existente nos defeitos dos restantes materiais. Tal pode dever-se à morfologia dos defeitos no cobre ser pouco favorável à adesão dos LP. Pelo facto de o cobre apresentar maior ductilidade comparativamente aos restantes materiais metálicos ensaiados, significa que para a mesma carga aplicada pelo indentador os defeitos padrão possuem maiores dimensões que os defeitos produzidos nos restantes materiais, pelo que os defeitos apresentam uma maior abertura superficial e reduzida profundidade. Esta morfologia de defeito difere consideravelmente da morfologia dos padrões de sensibilidade, já que os defeitos no cobre apresentam uma grande abertura à superfície face à sua profundidade, em contraste com as descontinuidades do padrão de sensibilidade, em que a razão entre a largura da descontinuidade e a profundidade é da ordem de 1/20. Este facto pode explicar, em parte, o fraco resultado na detecção de defeitos no cobre.

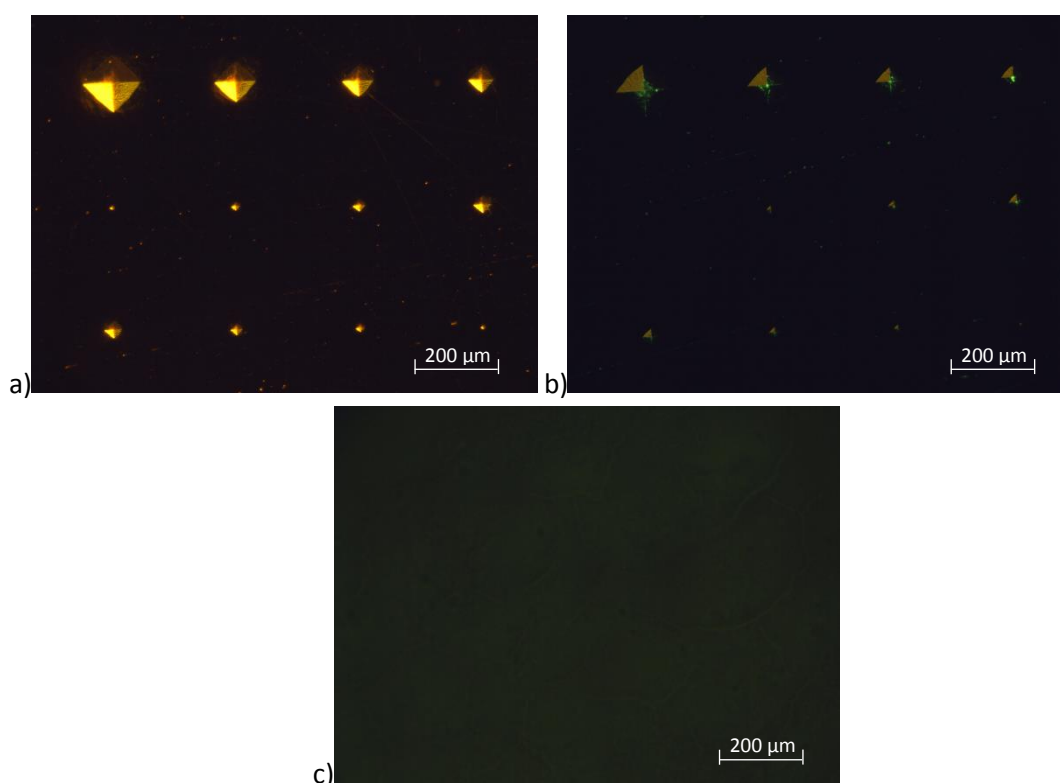


Figura 5.29 – Ensaio Cu. a) sem aplicação de LP; b) com LP; c) com LP (aplicação de revelador).

5.6.6 – Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)

No caso do ABS os LP não aderiram a nenhum dos defeitos padrão, conforme a Figura 5.30 ilustra, não tendo sido possível determinar o limiar de detectabilidade da técnica de END com LP neste material. Com efeito, verifica-se que também os LP apresentam limitações na detecção de defeitos em materiais poliméricos.

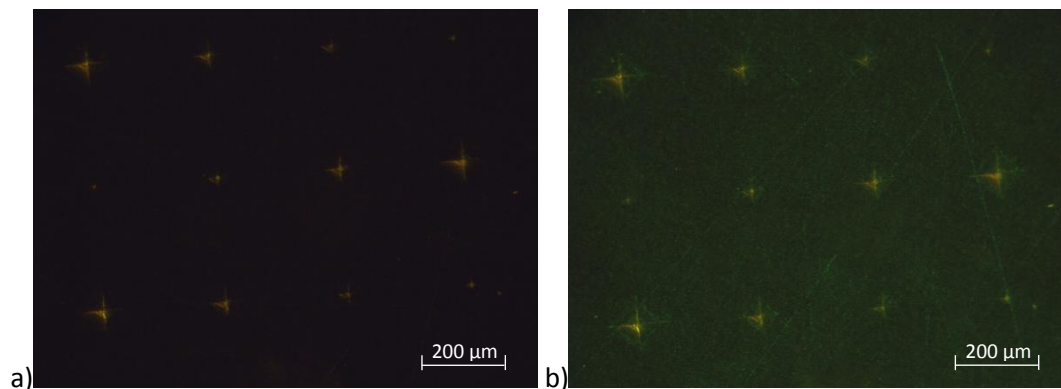


Figura 5.30 – Ensaio ABS. a) sem aplicação de LP; b) com LP (sem revelador).

5.6.7 – Padrão de sensibilidade da técnica de END por LP

O ensaio END com LP do padrão de sensibilidade tipo 1 teve como finalidade de garantir que o LP utilizado para os ensaios experimentais se encontrava em condições adequadas, bem como a função de servir de base de comparação para os resultados dos ensaios com CB. O END com LP permitiu detectar diversas fissuras do padrão de sensibilidade tipo 1, existindo contudo algum penetrante disperso na sua superfície, conforme a Figura 5.31 ilustra.

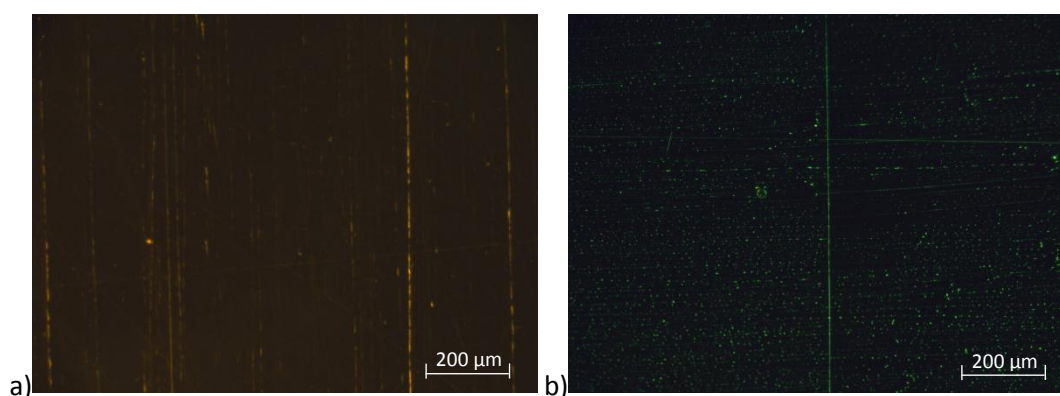


Figura 5.31 – Ensaio padrão de sensibilidade tipo 1.
a) sem aplicação de LP; b) com LP (sem revelador).

Apesar de os ensaios com LP permitirem a detecção de defeitos com cerca de 1 µm de espessura e 20 µm de profundidade, importa notar que esta morfologia de defeito não é tão desfavorável quanto inicialmente possa parecer.

Pelo facto de a técnica de END por LP e a técnica de END com CB se basearem na utilização de um fluido para a detecção de descontinuidades, um possível indicador da dificuldade de detecção de um defeito, é o quociente entre o volume da descontinuidade, V , e a área da sua abertura superficial, A_{sup} . Por conseguinte, a detecção de um defeito será mais favorável quanto maior for o valor do quociente, uma vez que um volume superior do defeito facilitará a sua detecção, enquanto que quanto menor for a sua abertura superficial, mais difícil será a penetração do fluido (LP ou suspensão de CB) na descontinuidade. Este quociente tem especial interesse quando analisada a etapa de remoção do excesso (existente em ambas as técnicas abordadas), em que quanto menor for a abertura superficial da descontinuidade, mais dificilmente será removido o fluido que penetrou nessa mesma descontinuidade, permitindo assim que na fase de identificação e interpretação seja detectado o defeito existente.

A Equação (5.1) e a Equação (5.2) apresentam o quociente para os padrões de sensibilidade (tipo 1) e para as micro indentações, respectivamente, sendo as dimensões de cada tipologia de defeito identificadas na Figura 5.32.

$$\frac{V}{A_{sup}} = \frac{l \cdot e \cdot h}{l \cdot e} = h \quad (5.1)$$

$$\frac{V}{A_{sup}} = \frac{\frac{l^2 \cdot h}{3}}{l^2} = \frac{h}{3} \quad (5.2)$$

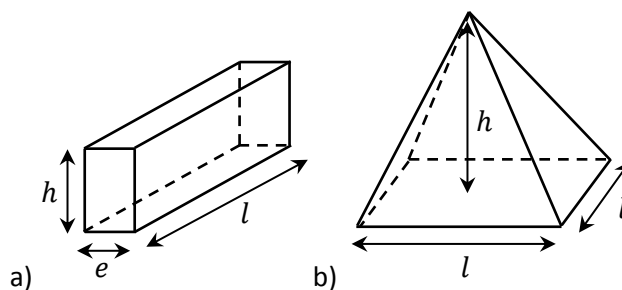


Figura 5.32 – Representação esquemática dos defeitos.
a) padrão de sensibilidade; b) micro indentação.

Verificou-se que o quociente para as micro indentações corresponde a 1/3 do quociente para os padrões de sensibilidade, o que significa que considerando dois defeitos com igual profundidade, são mais favoráveis os defeitos dos padrões de sensibilidade dos LP, contrariamente à intuição inicial.

5.7 – Análise de Resultados

A síntese dos resultados dos ensaios experimentais com a técnica de END com CB encontra-se na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Síntese dos resultados dos ensaios com CB.

Material	Tipo de defeito	Ensaio	Bactéria	Limiar de detectabilidade L [μm] / P [μm]	Defeito
AA 1100	Micro indentações	A, B, C, D	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -	11,1/2,2	H
AISI 316L	Micro indentações	C	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -	15,6/3,2	F
	Nano indentações	A	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -	5,3/0,4	L1
Titânio (grade 5)	Tipo risco	A	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -	*	—
	Soldadura laser	A	<i>Rhodococcus erythropolis</i> +	*	—
Níquel-titânio	Tipo risco	C	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -	*	—
	Soldadura laser	A	<i>Rhodococcus erythropolis</i> +	*	—
Carboneto de tungsténio	Micro indentações	A, C	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -	—	—
Ouro	Outras morfologias de defeitos	A	<i>Rhodococcus erythropolis</i> +	*	—
AISI 316L brasado	Micro indentações	B	<i>Rhodococcus erythropolis</i> —	11,9/2,4	G
Lentes oftálmicas	Micro indentações/ Tipo risco	A, B	<i>Rhodococcus erythropolis</i> -	—	—
Padrões de sensibilidade	Fissuras	A	<i>Rhodococcus erythropolis</i> +	1/20	—

* A morfologia do defeito não permite a definição das dimensões L e P.

Legenda: A – sem aplicação de campo eléctrico ou magnético; B – PF_Btriaxial (ímãs permanentes); C – PF_Btriaxial_permanente; D – PF_eléctrico.

Para os materiais que não possuíam defeitos padrão não foi possível quantificar o limiar de detectabilidade da técnica, quer por não serem conhecidas as dimensões dos defeitos, como pelo facto de as CB não terem aderido aos defeitos existentes, como por exemplo no caso dos provetes de titânio e níquel-titânio com defeitos do tipo risco.

Os resultados dos ensaios com a técnica de END com CB mostraram ser possível detectar os defeitos para a quase totalidade dos materiais em estudo, com excepção do carboneto de tungsténio e das lentes oftálmicas. No primeiro caso tal deveu-se ao facto de o provete de carboneto de tungsténio possuir cobalto na sua composição química, que devido às suas propriedades antibacterianas impossibilitou a adesão da suspensão de CB à superfície do provete. No caso das lentes oftálmicas, pelo facto de estas possuírem um revestimento com propriedades hidrofóbicas, não permitiram a adesão das CB à superfície e consequentemente a detecção de qualquer defeito.

No AA 1100 foram detectados todos os defeitos do provete (inclusivamente o defeito H), independentemente da aplicação de campos externos. Com efeito, não é possível concluir quanto ao efeito da aplicação de campos eléctricos ou magnéticos para a promoção da mobilidade e penetração nos defeitos. Foi verificada a repetibilidade dos resultados obtidos ao longo dos ensaios realizados.

Os ensaios realizados no provete de AISI 316L com nano indentações estabeleceram um novo valor para o limiar de detectabilidade da técnica de END com CB, tendo sido detectados todos os defeitos da matriz, inclusivamente o menor defeito ($L/P = 5,3/0,4 \mu\text{m}$).

Os ensaios dos materiais que não possuíam defeitos padrão permitiram identificar defeitos eram que desconhecidos antes dos ensaios (caso do titânio (*grade* 5) e níquel-titânio), e identificar de forma clara a morfologia superficial do provete (ouro).

Nos ensaios dos provetes que apresentavam defeitos do tipo risco foi possível a identificação dos mesmos. Foi contudo verificado que, dada a morfologia dos defeitos, a forma como é executada a limpeza do excesso da suspensão de CB condiciona o sucesso dos ensaios, pelo que a limpeza deve ser efectuada de forma não intrusiva, como por exemplo através do recurso a luz ultravioleta com comprimento de onda bactericida.

A utilização de padrões de sensibilidade (tipo 1) constituiu um método de controlo das CB, permitindo assegurar a comparabilidade dos resultados entre ensaios com CB e LP. Os resultados dos ensaios com a técnica de END com CB nos provetes de sensibilidade

demonstraram que as CB detectam os defeitos que se encontram no limiar de detectabilidade da técnica de END por LP.

Os resultados dos ensaios não permitiram concluir qual ou quais os protótipos funcionais que conduzem à obtenção de melhores resultado. Por outro lado, para o provete em AISI 316L com nano indentações, verificou-se que a aplicação de campo magnético conduziu a piores resultados, não possibilitando a obtenção de todos os defeitos da matriz. Este resultado necessita de ser avaliado através de novos ensaios, por forma a aprofundar devidamente este fenómeno, que de resto parece verificar-se também para outros materiais, conforme indicado na Tabela 5.11.

Com efeito, este é um resultado aparentemente contraditório, uma vez que era esperado que a aplicação de campo, eléctrico ou magnético, conduzissem sistematicamente a melhores resultados. A explicação para este fenómeno poderá, eventualmente, encontrar-se relacionada com os mecanismos microscópios envolvidos na adesão das CB à superfície do material. Estes mecanismos de adesão, sobretudo os de carácter mais biológico, que eventualmente são preponderantes, podem ser influenciados negativamente pela existência de campos eléctricos/magnéticos nas próprias CB, ou também no material dos provetes. Tal significa que pode acontecer que os campos eléctricos/magnéticos desempenhem a sua função de promover a mobilidade das CB sobre o material e a penetração das mesmas nas descontinuidades, mas que essa dinâmica, pretendida e benéfica, não surta efeito devido à inibição da adesão das CB ao material, justamente pela presença desses mesmos campos. Uma outra possibilidade é a formação de micro dipólos magnéticos/ micro alteração das cargas eléctricas junto das descontinuidades, cujo efeito fosse contrariar a adesão das CB.

Estas hipóteses deveriam ser testadas em trabalhos futuros para um correcto esclarecimento dos resultados experimentais obtidos, sendo esta uma questão bastante relevante, dado dela depender a concepção dos equipamentos dedicados para a inspecção com esta técnica de END. Em qualquer caso, pode ser realizado um ensaio com duas partes: uma primeira com a aplicação de campos eléctricos ou magnéticos para promover *mecanicamente* a mobilidade e penetração nos defeitos das CB; uma segunda fase em que esses campos são anulados de forma a possibilitar a ocorrência de mecanismos de adesão sem quaisquer perturbações externas. Este procedimento poderia esclarecer, quer a influência *mecânica* dos campos externos aplicados, quer a perturbação causada por estes nos mecanismos de adesão das CB.

Foram ainda estabelecidos novos valores para o limiar de detectabilidade no AISI 316L (L/P = 5,3/0,4 μm), AISI 316L brasado (L/P = 11,9/2,4 μm) e para os padrões de sensibilidade do tipo 1 (L/P = 1/20 μm).

Quanto aos ensaios com a técnica de END por LP, os resultados encontram-se sumariados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Síntese dos resultados dos ensaios com LP

Material	Tipo de defeito	Limiar de detectabilidade L [μm] / P [μm]	Defeito
AA 1100	Micro indentações	11,1/2,2	H
AISI 316L	Micro indentações	11,1/2,3	G
Titânio (<i>grade 5</i>)	Micro indentações	8,5/1,7	G
Níquel-titânio	Soldadura laser	*	–
Cobre	Micro indentações	21,8/4,4	F
ABS	Micro indentações	–	–
Padrões de sensibilidade	Fissura	1/20	–

* A morfologia do defeito não permite a definição das dimensões L e P.

Os resultados dos ensaios com LP mostraram ser possível detectar defeitos para todos os materiais em estudo à excepção do ABS, para o qual o ensaio se revelou inconclusivo. Foi verificado que a aplicação do revelador criava uma camada fina sobre a superfície dos provetes, impossibilitando a identificação dos defeitos. Assim, os resultados apresentados na Tabela 5.12 foram obtidos apenas com a aplicação da técnica de END por LP.

Foi possível detectar todos os defeitos no AA 1100, enquanto no AISI 316L e no titânio não foi possível detectar o defeito H. Para o cobre não foram identificados os defeitos G e H. O END com LP revelou ainda ser possível detectar de forma clara e em toda a sua extensão a fissura existente na soldadura laser do provete de níquel-titânio.

Foi estabelecido o limiar de detectabilidade para o AA 1100, AISI 316L, titânio (*grade 5*), níquel-titânio e cobre, tendo sido utilizado um microscópio óptico para a inspecção dos provetes e interpretação dos resultados, conforme referido no § 5.6.

Na Tabela 5.13 encontra-se a comparação dos resultados obtidos com a técnica de END com CB com os resultados dos END por LP.

Tabela 5.13 – Comparação dos ensaios com CB com os ensaios com LP.

Material	Técnica	Limiar de detectabilidade L [μm] / P [μm]
AA 1100	CB	11,1/2,2
	LP	11,1/2,2
AISI 316L	CB	5,3/0,4
	LP	11,1/2,3
Padrões de sensibilidade	CB	1/20
	LP	1/20

Verificou-se que os resultados das duas técnicas são idênticos, à excepção dos ensaios para o AISI 316L. Contudo os resultados obtidos neste material com cada uma das técnicas não são comparáveis, uma vez que apenas foram testados os defeitos correspondentes às nano indentações com a técnica de END baseada em CB. Com efeito, a impossibilidade de testar os defeitos do provete com nano indentações com a técnica de END por LP condiciona a comparação dos resultados. Porém, não foram detectados os defeitos H (micro indentações) do provete de AISI 316L testado com LP. Foi também constatada uma maior incidência de falsos positivos nos ensaios com LP face aos ensaios com CB.

5.8 – Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram caracterizados os provetes e as CB utilizados para a validação experimental da técnica de END baseada em CB. O procedimento experimental foi igualmente descrito. Foram discutidos os resultados dos ensaios experimentais da técnica de END com CB e da técnica de LP para cada um dos materiais testados. Por fim foram analisados os resultados dos ensaios e efectuado o comentário crítico aos mesmos.

6 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 – Introdução

As conclusões resultantes do trabalho realizado e as sugestões para desenvolvimentos futuros são apresentadas neste capítulo. As conclusões mais relevantes deste trabalho encontram-se presentes de forma implícita nos comentários aos resultados obtidos e resumidas na síntese de cada capítulo. Por conseguinte, neste capítulo serão reiterados os principais resultados e apresentadas as sugestões para desenvolvimentos futuros considerados relevantes para a técnica de Ensaio Não Destrutivo (END) com células bacterianas (CB).

6.2 – Conclusões

Foi projectado, produzido, caracterizado e validado experimentalmente um protótipo funcional para aplicação de campo magnético triaxial permanente, constituindo um novo equipamento dedicado para a técnica de END com CB. As soluções construtivas adoptadas cumprem com os requisitos funcionais inicialmente estabelecidos para o protótipo funcional, permitindo em particular a aplicação de um campo magnético permanente de elevada intensidade (da ordem de 1000 Gauss), e a variação da frequência do campo aplicado.

Foi simulado analiticamente o movimento das CB para diferentes intensidades e frequências do campo eléctrico aplicado. Foi obtida experimentalmente uma estimativa da carga da bactéria *Rhodococcus erythropolis* DCL14, utilizada nos ensaios experimentais, a partir da medição do deslocamento da bactéria para diferentes intensidades do campo eléctrico externo aplicado.

Verificou-se experimentalmente que a massa da bactéria possui uma importância diminuta no modelo analítico do movimento, sendo o seu efeito desprezável face aos restantes termos da equação diferencial que traduz o movimento das CB. Com efeito, foram identificadas algumas limitações do modelo, sendo que a mecânica vectorial newtoniana pode ser inadequada para traduzir as interacções existentes entre as CB, os defeitos do material e os campos externos aplicados. Esta convicção é também suportada pelos resultados da validação experimental da técnica de END com CB, em que também não foi evidente qual o verdadeiro efeito que a aplicação de campos eléctricos ou magnéticos desempenhou na mobilidade e penetração das CB nas descontinuidades que os materiais testados apresentavam.

Relativamente aos ensaios experimentais com a técnica de END com CB, foram detectados os defeitos para os materiais testados, com excepção do carboneto de tungsténio e das lentes oftálmicas. Os materiais poliméricos e o WC inibem a adesão das bactérias usadas e, consequentemente, a detecção dos defeitos.

Relativamente ao ouro verificou-se que superfícies maquinadas são mais favoráveis à adesão do que as superfícies indentadas/cunhadas. Concluiu-se que para além da composição química dos materiais, a sua topografia também influencia fortemente o comportamento das CB. Estas são algumas das evidências que apontam para o facto de o comportamento dinâmico e os mecanismos de adesão e de detecção de defeitos serem mais complexos do que inicialmente tinha sido previsto. Verifica-se assim que estes mecanismos envolvem outros

fenómenos cuja natureza não é convenientemente descrita pelo modelo analítico baseado na mecânica vectorial newtoniana.

Para o provete de AISI 316L com nano indentações foram detectados a totalidade dos defeitos do provete (inclusivamente o defeito L1), tendo sido estabelecido um novo valor para o limiar de detectabilidade ($L/P = 5,3/0,4 \mu\text{m}$) da técnica de END com CB.

Foram também estabelecidos novos valores para o limiar de detectabilidade no AISI 316L ($L/P = 11,1/2,2 \mu\text{m}$), AISI 316L brasado ($L/P = 11,9/2,4 \mu\text{m}$) e para os padrões de sensibilidade do tipo 1 ($L/P = 1/20 \mu\text{m}$).

A utilização de padrões de sensibilidade (tipo 1) constituiu um método de controlo das CB, permitindo assegurar a comparabilidade dos resultados entre ensaios com CB e LP. Os resultados dos ensaios com a técnica de END com CB nos provetes de sensibilidade demonstram que as CB detectam os defeitos que se encontram no limiar de detectabilidade da técnica de END por líquidos penetrantes (LP).

Foram identificados os defeitos do tipo risco produzidos no titânio (grade 5) e no níquel-titânio. Foi também verificado que, devido à morfologia dos defeitos, a forma como é executada a limpeza do excesso da suspensão de CB condiciona o sucesso dos ensaios. Concluiu-se que a limpeza deve ser efectuada de forma não intrusiva, nomeadamente através da utilização de luz ultravioleta com comprimento de onda bactericida.

No decorrer dos ensaios experimentais verificou-se que a concentração da suspensão de CB tem influência nos resultados obtidos. Com efeito, quanto maior a concentração utilizada, mais facilmente foram detectados os defeitos, em virtude de as CB preencherem melhor o interior das descontinuidades. Também foi comprovado que a utilização de bio-surfactante facilita a penetração das CB nos defeitos, uma vez que reduz a tensão superficial da suspensão que contém as CB.

Quanto aos ensaios com LP, mostraram ser possível detectar defeitos para todos os materiais em estudo à excepção do ABS. Constatou-se que a aplicação do revelador criava uma camada fina sobre a superfície dos provetes, impossibilitando a identificação dos defeitos. Deste modo, a detecção dos defeitos apenas foi possível com a aplicação dos LP sem a realização da fase de revelação.

Foi estabelecido o limiar de detectabilidade da técnica de END por LP para o AA 1100 ($L/P = 11,1/2,2 \mu\text{m}$), AISI 316L ($L/P = 11,1/2,3 \mu\text{m}$), titânio (*grade 5*) ($L/P = 8,5/1,7 \mu\text{m}$) e cobre

($L/P = 21,8/4,4 \mu\text{m}$), tendo sido utilizado um microscópio óptico para a inspecção dos provetes e interpretação dos resultados. Foi também detectada de forma clara, e em toda a extensão, a fissura existente na soldadura laser do provete de níquel-titânio.

Os resultados obtidos com as duas técnicas de END utilizadas neste trabalho são equiparáveis, sendo contudo importante notar o carácter distinto das técnicas. Enquanto os END por LP se tratam de uma técnica consagrada, com inúmeros anos de estudo e melhoramentos, a técnica de END baseada em CB, apesar do conhecimento processual já existente, é de índole mais exploratória, encontrando-se numa fase muito mais inicial do seu desenvolvimento. Deste modo, os resultados obtidos são satisfatórios, sendo que revelam o potencial da técnica de END com CB para a detecção de micro e nano defeitos superficiais.

6.3 – Propostas para desenvolvimentos futuros

Um dos aspectos que merece algum desenvolvimento adicional é a etapa de revelação da técnica de END com CB, por forma a ser possível a identificação de defeitos superficiais sem o recurso à observação com microscópio óptico.

Outro assunto que merece ser explorado é a utilização de outras CB, em concreto bactérias que possuam uma maior resposta aos campos eléctricos ou magnéticos aplicados pelos equipamentos dedicados. Como anteriormente referido nas conclusões, a utilização de suspensões de CB mais concentradas e a redução da tensão superficial da gota que contém as CB através de bio-surfactantes, constituem dois temas a desenvolver em trabalhos futuros.

Outro assunto que merece atenção é a observação com microscópio electrónico de varrimento (SEM) das novas morfologias de defeito após a fase de revelação, nomeadamente, das matrizes de nano indentações e dos defeitos do tipo risco, por forma a ser possível aprofundar o conhecimento sobre a interacção entre as CB e a morfologia dos defeitos.

Com a finalidade de tornar possível comparar os melhores resultados da técnica de END com CB com os da técnica de END por LP é necessário testar esta última nos nano defeitos.

Em virtude de os resultados dos ensaios experimentais não terem permitido concluir qual ou quais os protótipos funcionais que conduzem à obtenção de melhores resultados e se a aplicação de campos, eléctricos ou magnéticos, favorece de facto a mobilidade e penetração das CB nos defeitos, é necessário a realização de novos ensaios para aprofundar devidamente este fenómeno. Estes ensaios revestem-se de grande importância, uma vez que os seus

resultados irão determinar a estratégia a adoptar para a concepção de futuros equipamentos dedicados para a inspecção com a técnica de END com CB.

A procura de aplicações industriais para a técnica de END com CB foi iniciada neste trabalho, tendo sido contactada a Zollern. Esta empresa do sector metalúrgico forneceu algumas amostras para serem ensaiadas, nomeadamente uma prótese de fémur (liga de cobalto-crómio 9100) e uma peça de aeronáutica (liga de INCONEL 9095). Visto estas amostras só terem sido recebidas na fase final deste trabalho, não foi possível ensaiá-las com a técnica de END com CB, pelo que se propõe a sua inspecção num trabalho futuro.

A continuação da pesquisa de aplicações industriais para esta nova técnica de END constitui um assunto a ser desenvolvido no futuro, nomeadamente o estudo da adequabilidade da técnica para a inspecção de componentes de ortodontia, próteses e componentes micro fabricados, através de parcerias com diferentes empresas e instituições, tais como a Maló Clinic ou o Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticos (CENTIMFE).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Griesbach, M. C. Wurz, and L. Rissing, "Modular Eddy Current Micro Sensor", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, pp. 3760-3763, Oct 2011.
- [2] V. Mahendran and J. Philip, "Naked eye visualization of defects in ferromagnetic materials and components", *NDT & International*, vol. 60, pp. 100-109, Dec 2013.
- [3] J. P. d. S. Borges, "Desenvolvimento de Técnicas Baseadas em Filmes de Células Bacterianas para Aplicação em Ensaios Não Destrutivos de Materiais de Engenharia", Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.
- [4] B. S. Mateus, "Desenvolvimento e Aplicação de Equipamento Para Detecção de Defeitos Através de Suspensão de Células Bacterianas em Componentes Microfabricados", Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- [5] D. Carvalho, "Desenvolvimento e Aplicação de Técnicas Inovadoras de Ensaios Não Destrutivos (END) com Células Bacterianas", Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- [6] P. Inácio, "Inspeção de componente micro fabricados com células bacterianas: simulação, instrumentação e validação experimental", Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [7] J. S. Moodera and P. Leclair, "Spin electronics - A quantum leap", *Nature Materials*, vol. 2, pp. 707-708, Nov 2003.
- [8] M. Pelkner, A. Neubauer, M. Blome, V. Reimund, H.-M. Thomas, and M. Kreutzbruck, "Flux leakage measurements for defect characterization using NDT adapted GMR sensors", *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, pp. 217–224, 2011.
- [9] M. Cacciola, G. Megali, D. Pellicano, and F. C. Morabito, "A GMR-ECT based embedded solution for applications on PCB inspections", *Sensors and Actuators a-Physical*, vol. 167, pp. 25-33, May 2011.
- [10] J. Kim, G. Yang, L. Udpa, and S. Udpa, "Classification of pulsed eddy current GMR data on aircraft structures", *NDT & International*, vol. 43, pp. 141-144, Mar 2010.
- [11] M. Pelkner, A. Neubauer, V. Reimund, M. Kreutzbruck, and A. Schuetze, "Routes for GMR-Sensor Design in Non-Destructive Testing", *Sensors*, vol. 12, pp. 12169-12183, Sep 2012.
- [12] Zeiss, http://www.zeiss.pt/vision-care/pt_pt/better-vision/entendendo-a-visao/lentes-e-solucoes/visibilidade-nitida-constante-gracas-a-revestimentos-de-alta-tecnologia.html. (Acedido em 2014/08/07)
- [13] Molecular Probes, *LIVE/DEAD® BacLight™ Bacterial Viability Kits*.
- [14] T. G. Santos, R. M. Miranda, and C. de Carvalho, "A new NDT technique based on bacterial cells to detect micro surface defects", *NDT & International*, vol. 63, pp. 43-49, April 2014.
- [15] A. H. Committee, *Nondestructive Evaluation and Quality Control* vol. 17, 1992.
- [16] F. P. Almeida, J. Barata, and P. Barros, "Ensaios não Destrutivos," ed: ISQ, 1992.
- [17] ISO 3452-3, "Non-destructive testing - Penetrant testing -Part 3: Reference test blocks", 1998.
- [18] MR Chemie, http://www.mr-chemie.de/en/products/penetrant_testing/fluorescent/. (Acedido em 2014/06/18)
- [19] Karl Deutsch, <http://www.kdn.se/produkter/penetrantprovning/kd-check-penetrant-for-sprickindikering>. (Acedido em 2014/06/17)
- [20] Magnaflux, <http://www.magnaflux.com/Products/LiquidPenetrantInspection/MaterialsFluorescent%28Zyglo%29/tabid/99/Default.aspx>. (Acedido em 2014/06/17)

- [21] U. S. Department of Energy, *Magnetic Forces on Ferromagnetic Objects*, <https://www.sbms.bnl.gov>. (Acedido em 2014/03/25)
- [22] Infopédia, [http://www.infopedia.pt/\\$movimento-browniano](http://www.infopedia.pt/$movimento-browniano), (Acedido em 2014/01/15)
- [23] J. B. Cardoso and P. G. Coelho, *Apontamentos de Métodos Computacionais em Engenharia Mecânica*.
- [24] MatWeb, <http://www.matweb.com/>.(Acedido em 2014/05/02)
- [25] N. A. Sakharova, J. V. Fernandes, J. M. Antunes, and M. C. Oliveira, "Comparison between Berkovich, Vickers and conical indentation tests: A three-dimensional numerical simulation study", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, pp. 1095-1104, Mar 1 2009.
- [26] L. G. L. Sorger, "Characterization of processed materials by electrical currents: development of equipment and applications", Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

ANEXOS

Anexo 1 – Caracterização dos provetes produzidos

Tabela A1 – Caracterização dos provetes produzidos

Material	Acabamento superficial	Morfologia de defeito	N.º de provetes
AA 1100	Polimento	Micro-ind.	2
AISI 316L	Polimento	Micro-ind.	3
		N	1
		R	1
AISI 6082	Polimento	Micro-ind.	1
Cobre	Polimento	Micro-ind.	3
Carboneto de tungsténio	Pulverometalurgia	Micro-ind.	1
Titânio (<i>grade 5</i>)	Polimento	Micro-ind.	3
	Polimento	R	
	Soldadura laser	D	1
	Micro shot pinning	D	1
Níquel-titânio	Polimento	R	1
	Soldadura laser	D	1
Magnésio (AZ31)	Polimento	Micro-ind.	3
Latão (CZ121)	Polimento	Micro-ind.	3
Ouro	–	Fresamento/Cunhagem	1
Prata	–	D	1
ABS	Polimento	Micro-ind.	2
Nylon	Polimento	Micro-ind.	3
PTFE	Polimento	Micro-ind.	2
Lentes oftálmicas	–	Micro-ind.	1
	–	R	2
FR4 (pistas de circuito)	–	D	4

Legenda: M – Micro-indentações; N – Nano-indentações; R – Defeitos do tipo risco;
D – Desconhecia-se o tipo de defeito existente antes da realização do ensaio.

Anexo 2 – Resolução numérica da equação diferencial do movimento de uma bactéria

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Resolução numérica do movimento da equação diferencial do movimento
% de uma bactéria
%
% Análise dinâmica transiente pelo Método de Newmark
% Regra trapezoidal (método implícito)
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Dados da bactéria
Raio_Bac = 0.5*1e-6; %[m]
Densidade_Bac = 1000;
Perc_Fe_Bac =0.5; [%]
V_bacteria = (4/3)*pi*Rao_Bac^3;
% Densidade: igual à da água (1000 kg/m^3)
%
% Massa da bactéria (kg)
% =====
M = (1-(Perc_Fe_Bac/100))*V_bacteria * 1000 +
(Perc_Fe_Bac/100)*V_bacteria * 7950;
%
% Amortecimento devido ao atrito
% =====
C = 6*pi*1e-3*0.5e-6; % Atrito (C = 6*pi*meuw*r)
%
% Força gerada pelo campo elétrico
% =====
% Definição da frequência (Hertz)
Freq= 1;
% Frequência (Radianos/s)
W= Freq*2*pi;
% Intensidade do campo elétrico
Q = 1.1837e-014; %força campo magnético solenóide = Q sen(wt)
% Definição da força inicial (t= 0)
F= 0;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Análise dinâmica implícita
%
fprintf('\nAnálise dinâmica pelo método de Newmark\n');
%
% Definição do instante final (t_final), incremento (dt) e
% número de instantes (nt)
t_final= 2; % segundos (a análise inicia-se sempre em t= 0)
dt= t_final/100;
nt= floor(t_final/dt);
fprintf('T inicial= 0 , T final= %f\n',t_final);
fprintf('Passo, dt= %f , Número de passos, nt= %d\n',dt,nt);
%
% Vectors onde vai ser guardado o deslocamento velocidade e
aceleração
u=zeros(1,nt);

```

```

v=zeros(1,nt);
a=zeros(1,nt);
%
% Inicialização de deslocamentos, velocidades e acelerações
u(1)= 0;
%
% Método de Newmark (Regra trapezoidal)
for i=2:nt
    %
    % Força provocada pelo campo elétrico
    t= i*dt;
    F= Q*sin(W*t);
    %
    % Aceleração
    a(i)= (M+C*(dt/2)) \ (F-C*(v(i-1)+a(i-1)*(dt/2)));
    %
    % Velocidade
    v(i)= v(i-1)+(a(i)+a(i-1))*dt/2;
    %
    % Deslocamento
    u(i)= u(i-1)+v(i-1)*dt+(a(i)+a(i-1))*(dt/2)^2;
    %
end
% Gráficos
figure;
t = 0:dt:t_final-dt;
plot(t,u/1e-6);
xlabel('t [s]', 'interpreter','latex','FontSize',17);
ylabel('$x(t)$ [$\mu$m]', 'interpreter','latex','FontSize',17);
%
% end-of-file

```

Anexo 3 – Medição experimental da rugosidade

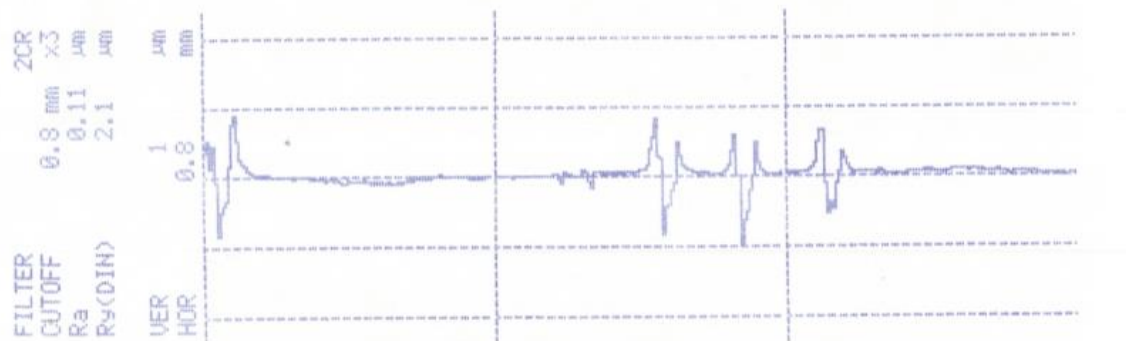


Figura A1 – Medição experimental da rugosidade de três riscos do provete de AISI 316L.

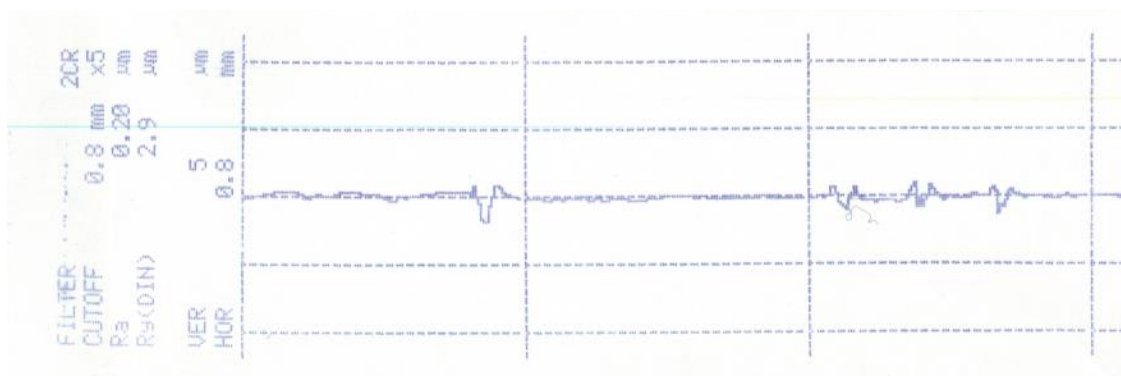


Figura A2 – Medição experimental da rugosidade de três riscos do provete de titânio.

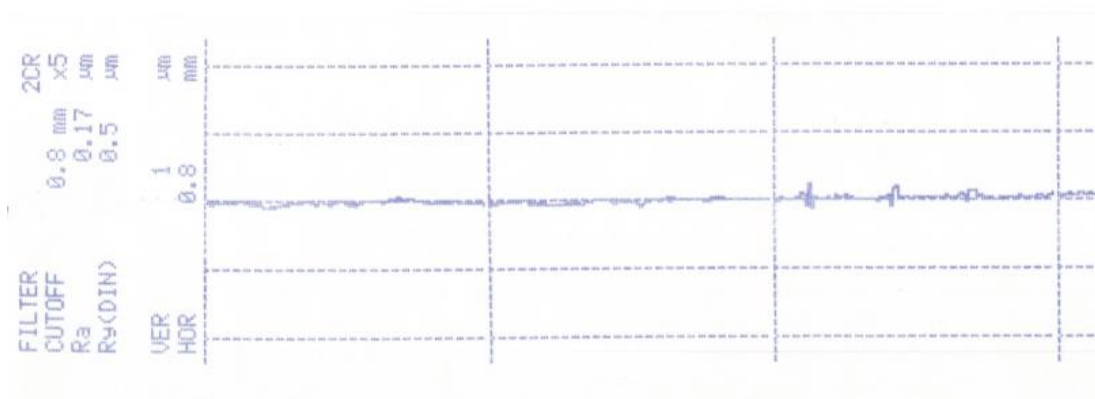


Figura A3 – Medição experimental da rugosidade de três riscos do provete de níquel-titânio.